



TITLE:

物体色の高速測定と自動化への適用に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

中村, 靖

CITATION:

中村, 靖. 物体色の高速測定と自動化への適用に関する研究. 京都大学, 1985, 工学博士

ISSUE DATE:

1985-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5587>

RIGHT:

物体色の高速測定と自動化への
適用に関する研究

昭和59年12月

中 村 靖

物体色の高速測定と自動化への 適用に関する研究

中 村 靖

DOC

1984

17

電気系

目 次

第一章 序論

1. 1 本研究の背景	1
1. 2 研究開発課題	2
1. 3 関連研究の経過と問題点	3
1. 4 本論文の内容概説	6

第二章 フォトダイオードの精密測色用受光器としての検討

2. 1 はじめに	9
2. 2 フォトダイオードの基本的特性	10
2. 2. 1 等価回路と光電変換系の構成	10
2. 2. 2 分光感度特性	12
2. 2. 3 応答速度	14
2. 3 フォトダイオードによる測光精度	18
2. 3. 1 光電変換系の非直線誤差	18
2. 3. 2 交流成分雑音による誤差	20
2. 3. 3 直流成分雑音による誤差	22
2. 4 デジタル光電測色系の構成と総合誤差	26
2. 4. 1 デジタル光電測色系の構成	26
2. 4. 2 総合誤差	26
2. 5 まとめ	28
付録 付表 2-1, 2-2, 2-3	30

第三章 フォトダイオード一次元配列による分光反射率の高速測定

3. 1 はじめに	32
3. 2 高速分光測定試作装置の構成	33
3. 2. 1 光学系	33
3. 2. 2 モノクロメータおよび受光器の構成	33
3. 2. 3 照明系	38
3. 2. 4 電気系の構成	41

3.3 検出精度の検討	41
3.3.1 受光器系の直線性	41
3.3.2 交流成分雑音	42
3.3.3 直流成分雑音	45
3.3.4 信号検出系の総合精度	45
3.4 データ処理による精度向上	45
3.4.1 受光器の中心波長誤差補正	45
3.4.2 迷光誤差補正	47
3.4.3 検出値の加算平均	49
3.5 実測結果による評価検討	50
3.6 まとめ	52
第四章 フォトダイオードによる色分解受光モジュール	
4.1 はじめに	53
4.2 色分解受光モジュールの構造と特性	54
4.2.1 モジュールの構造と信号光の伝達率	54
4.2.2 受光面の照度均一性	58
4.3 色分解受光器の設計	62
4.3.1 色フィルタとフォトダイオードの組み合わせ	62
4.3.2 計算機によるフィルター厚みの最適設計	64
4.4 色分解受光モジュールの評価	65
4.4.1 色分解受光モジュールの使用形態	65
4.4.2 他の色分解受光方式との比較	69
4.4.3 色分解受光モジュールによる測光精度と測色精度	72
4.5 まとめ	74
第五章 計算機シミュレーションによる調色自動化の基礎的検討	
5.1 はじめに	77
5.2 色合せ評価シミュレーション計算の根拠	78
5.2.1 基礎式	78
5.2.2 色合せ評価のためのシミュレーション計算式	80

5.3	シミュレーション計算プログラムとシミュレーション精度の評価	82
5.3.1	シミュレーション実行計算機プログラム	82
5.3.2	シミュレーション精度の確認実験	84
5.4	色合せ評価シミュレーション計算による二・三の問題の解析例	88
5.4.1	補正式の効果の検討	88
5.4.2	色材のK/S値非直線性に対する対策	90
5.5	まとめ	96
	付録5-1. 色材基準定数(K/S)を折線近似で表わした場合の調色計算式	96
	付録5-2. 色材の二定数(K, S)を分離して扱う場合の調色計算式	99
第六章 調色計算装置		
6.1	はじめに	101
6.2	調色計算の理論と計算プログラムの構成	101
6.2.1	基礎理論	101
6.2.2	調色計算方程式	103
6.2.3	調色計算プログラムの構成	107
6.3	調色計算用分光光度計の検討	110
6.4	調色計算装置の構成	113
6.4.1	分光光度計	113
6.4.2	操作盤	116
6.4.3	計算機	117
6.4.4	高速型調色計算装置	117
6.5	調色計算装置の適用と評価	120
6.5.1	染色分野への適用	120
6.5.2	混紡布調色への適用	120
6.6	まとめ	122
第七章 色彩画像解析システム		
7.1	はじめに	125
7.2	色彩画像解析システムの構成	126
7.2.1	色彩画像入力装置	126

7. 2. 2	高速画像処理装置	129
7. 2. 3	色彩画像表示装置及び会話端末	133
7. 3	色彩画像解析ソフトウェア	134
7. 3. 1	ソフトウェアの全体構成	134
7. 3. 2	色彩画像処理・解析ライブラリ	136
7. 4	色彩画像解析例と評価	137
7. 5	まとめ	141
第八章 色彩印刷物判別方式と検査選別装置		
8. 1	はじめに	143
8. 2	色彩印刷物判別方式	144
8. 2. 1	色彩印刷物の特性	144
8. 2. 2	色彩印刷物の種類判別方法	147
8. 2. 3	色彩印刷物の正否判別方法	153
8. 2. 4	正否判別いき値の自動設定・自動修正	155
8. 3	色彩印刷物検査選別装置の構成	159
8. 3. 1	装置の概要と機能	159
8. 3. 2	光電系の構成と検出信号の正規化	161
8. 3. 3	信号処理系の構成	163
8. 4	色彩印刷物判別実験	165
8. 5	まとめ	168
第九章 結論		170
参考文献		176
謝辞		182

第一章 序論

1. 1 本研究の背景

産業界の各方面で自動化が積極的に進められてきた。自動化技術は単に生産性の向上や労働力不足対策だけでなく、苛酷労働や単純作業から人間を解放し、人間性豊かな社会を作る上でも不可欠な技術となっている。本格的な自動化技術は1950年頃の米国自動車工場において、いわゆるデトロイト・オートメーションとして始まり、その後製造業だけでなく流通業などさまざまな分野にまで広がっていった。

長年月にわたり自動化技術が追及されて来たため、人間の手・足の機能を機械化する比較的単純な自動化はほぼ満足すべき段階にまで達した。その結果、人間の感覚機能や判断機能まで含んだ、高度な自動化に対する要求が年々高まって来た。このような高度な自動化の一分野として色彩を扱う業務の自動化がある。

物体の色彩情報は形状情報とならんで基本的な情報であり、①染色や着色、色の管理など色そのものが直接の対象となる業務、②色を手がかりにした検査や選別など、色を間接的に活用している業務、など、色彩情報ぬきでは存在し得ない業務も数多く見受けられる。さらに近年は工業製品が多品種少量生産の傾向を強め、高付加価値製品の比率が高まっており、色彩が製品価値を左右する重要な存在になって来た。色の生産、管理、検査など色彩を扱う業務への要求が量的にも質的にも高まっている。

色彩情報は人間の視覚を通じて意味を持つ情報であるから、色彩にかかわる業務は人間の目をたよりとして処理されるのがこれまでの一般的な姿である。しかし人間の視覚では、①量的な増大に応じるにも限度がある。②色を定量的にとらえることが困難であり、個人差や条件等色など質的な面でも難点がある。などの問題があるため、視覚にたよるこれらの業務を自動化したいとの要求は古くからあり、その要求は増々強まっている。

色彩を扱う業務の自動化を実現するためには、既存の色彩理論や測色技術に加えて新しい色彩情報処理技術の研究が不可欠である。計算機に代表される情報処理装置の著しい進歩・普及により、色彩情報を計算機で処理する環境が近年急速にととのって来た。このような状況認識と問題意識のもとに、物体色を高速高精度に測定する技術の研究開発と、産業応用を中心とした色彩情報の処理方式及びそれを応用した自動化装置の研究開発を実施した。

色彩を扱う業務は多種多様であるが、本研究では代表的な業務である調色自動化と色彩印刷物検査選別の自動化を具体的な目標として取り上げた。調色は色見本と同一の色を再現するための色材の混合比率を求める業務であり、色彩印刷物検査選別は、たとえば流通銀行券の正否を検査選別する業務である。いずれも自動化に対する要求が強く、かつ色彩情報処理に関連して基本的な問題を含んでいるから、これらの自動化を通じて確立した色彩情報処理技術は広く一般性のある技術になる事が期待できる。

1. 2 研究開発課題

基礎的な色彩理論や測光測色技術は主として照明工学の一環として長年にわたり研究が進められ、それ自体は完成に近いレベルに達している。しかしこれらは必ずしも物体色測定を中心としたものではないし、また自動化装置への適用を目的に研究開発されたものではないから、色彩にかかわる業務の自動化を実現するためには多くの研究開発課題がある。主な課題は①物体色を高速高精度に測定し色彩情報を計算機に入力する技術、②多量の色彩データを効率良く解析するツール、③個々の自動化目的にそって色彩情報を効果的に処理する技術、の研究開発である。

(1) 物体色を高速高精度に測定し計算機に入力する技術

自動化をはかり経済的な効果を得るためには速度が重要な要素である。また人間の視覚に替えて自動化をはかる場合、物体色の測定は人間の視覚と同等ないしはそれ以上の精度が要求される。人間の色彩に対する識別能力は非常に高いから、色彩にかかわる業務の自動化を進めるためには十分に高い測定精度を保ちつつ測定速度を高めることが要求される。

物体色を測定する手段として分光光度計や光電色彩計がある。これら測色装置は測定精度的には十分なものであるが、必ずしも自動化装置への適用を主目的としたものではないから、自動化装置における色彩情報入力装置として使用する時、測定速度、操作性、コンパクト性などの点で問題がある。特に分光光度計は分光素子を機械的に駆動する方法を取るため一般に測定速度が遅く、通常の分光光度計では一資料の測定に数十秒を要する。自動化装置用の色彩情報入力装置としては大幅な高速化が望まれる。

分光光度計や光電色彩計など高精度測色装置では、高い測色精度を得るため多くの場合受光器として感度の非常に高い光電子倍增管が使われているが、自動化装置などの産業用途の測色装置としてはコンパクト性、信頼性、経済性などの点から、フォトダイオードの

ような半導体受光器を使用した物体色の高速高精度測定技術が重要である。

(2) 多量の色彩データを効率良く解析するツール

色彩にかかわる業務の自動化をはかる時、装置やアルゴリズムを研究する段階で多量の色彩データを解析する必要がある。調色自動化の場合には多数の色見本について色合わせ精度を評価し、経験的に定まる要因の最適値を見出すが、この色合わせ精度評価を計算機シミュレーションで行なうなどの解析ツールがあれば、性能の高い調色計算装置を迅速に開発することができる。色彩印刷物検査選別の自動化の場合には、対象となる色彩印刷物の特性をよく分析し、判別アルゴリズムの検討や色彩情報処理パラメータの最適値の検討を行なう必要がある。この場合対象物体の色が二次元的に分布し色彩画像を形成しているから、一資料当りの色彩情報量の多さと、測定面分解能のこまかさの点から既存の測色器では測定・解析が不可能である。二次元的に分布する色彩データを効率良く解析できるツールが不可欠である。

(3) 個々の自動化目的にそって色彩情報を効果的に処理する技術、

色彩を扱う業務の自動化装置は、色彩情報を入力するための測色装置と計算機の組合わせで構成されるが、計算機内での色彩情報処理方式が最大の課題である。色彩情報処理とは得られた色彩情報を計算機内で処理し、目的にそより高次の情報を得ることである。調色自動化の場合には色見本と等色を得るための色材配合比率が目的とする高次の情報である。色彩印刷物検査自動化の場合には個々の色彩印刷物の判別結果が目的とする高次の情報である。

基礎的な色彩理論は大むね確立されているが、色彩を扱う種々の業務において自動化を実現するための具体的な色彩情報処理方式は多くの場合未知である。また何らかの先行研究が行なわれている場合でも、産業的に実用レベルに達するものを得るためには、効果的な色彩情報処理方式および処理装置の研究開発が必要である。

以上の様に研究開発課題を設定し、物体色を高速高精度に測定する技術と、産業応用を中心とした色彩情報の処理方式及びそれを応用した自動化装置の研究開発を実施した。

1.3 関連研究の経過と問題点

本研究では以上の様な背景のもとに、フォトダイオードを使用して物体色を高速高精度に測定する技術の研究開発、およびこれを応用して調色計算装置や色彩印刷物判別装置な

ど色にかかわる業務の自動化装置の研究開発を実施した。本節では他者の研究を中心に関連する研究の経過と問題点を概観する。

シリコン・フォトダイオードは当初太陽電池として開発・実用に供されたが、構造が非常に簡単で特性が安定しており直線性も非常に良い光電変換素子であるため、これを精密測光用の受光器として使用する動きが出て来た。1968年室井らはシリコン光電池を精密受光器として使用する事の検討を行ない、疲労現象が無く、温度特性が安定していることなど、セレン光電池と比較して特性がすぐれている事を指摘²⁻⁵⁾した。P. H. Wendlandらは1971年フォトダイオードと高性能演算増幅器の組み合わせにより光電子増倍管の特性にせまる高精度測光が可能であることを示した。²⁻⁸⁾ P. G. Witherellらはフォトダイオードの光電流出力の直線性を理論的に検討した。²⁻⁷⁾ また1972年香取は実験的にフォトダイオードの直線性を検討し、測光用受光器としてすぐれている事を示している。¹⁻⁴⁾ R. H. Hamstraらは1972年にフォトダイオードの雑音要因を分析し、雑音等価回路²⁻⁹⁾を提示している。以上の研究を通じてフォトダイオード自体の種々の特性はほぼ十分に解明されているが、有効3桁以上の測光精度を持つ物体色測定に使用するためには、受光器、増幅器、A・D変換器からなる光電計測系の総合的な誤差を詳細に分析する必要がある。

フォトダイオードを使用した測色技術について、1973年G. Horlickらは自己走査型のCCDラインセンサーを使用し、分光分布特性を高速に測定する方式³⁻²⁾を示している。これは化学分析を目的とし有効精度も2桁程度の測定方法であり、有効3桁を必要とする物体色測定には問題が残されている。¹⁻¹⁾ 1976年H. Katoらはフォトダイオードと色フィルターをSi基板上で組み合わせたカラーセンサー⁴⁻³⁾を開発した。また、1978年谷らはSi・PN接合層を複数かさねることにより異なる分光感度の受光器をSiチップの中に二重に作り込んだ半導体カラーセンサー¹⁻⁶⁾を報告した。これらは色コードなどの比較的色彩の大きい色の識別には非常に有効であるが、小色彩の物体の色の識別用に使用するには測色精度面で無理がある。

調色自動化の基礎となる理論の研究はかなり古くから行なわれている。¹⁻⁹⁾ 1931年P. Kubelkaらは色材の中に吸収係数(K)と散乱係数(S)を想定し、色材の濃度と光の反射率とを関係付ける二定数理論¹⁻³⁾を示し、1940年D. R. Duncanは色材定数の加法性理論⁵⁻³⁾を明らかにし、J. L. Saundersonは反射率測定値の界面反射補正式⁵⁻⁴⁾を明らかにした。以上の基礎的な研究により調色計算の理論的裏付けが明らかにされた。1967

年W. D. Ross は実験式による二定数理論の改良式¹⁻¹⁰⁾を示し、湊らはクベルカムンク二定数理論を発展させたReference Color法による調色計算法⁵⁻⁷⁾を示すなど、種々の改良研究も行なわれた。1966年E. Allenは調色計算法⁵⁻⁵⁾を示し、線形近似方程式と繰返し計算法により調色計算法を求める方法を明らかにした。これらの研究により分光光度計と計算機を使用して調色計算を行なう理論が確立された。しかしこの理論には多くの仮定や近似が含まれているため、実際に調色計算を適用する場合には種々の経験的に決まる要因を加味する必要がある、この経験的要因を適確迅速に定める方法が残された問題であった。

1963年H. R. Davidson らはアナログ計算機を使用し、二定数理論にもとづく調色計算装置⁶⁻¹⁾を開発し、繊維やプラスチックなどの調色現場で実用化した。A. E. Cutler は1965年改良型のアナログ式の調色計算装置を開発し、さらに1967年大照らは学習機構を持つ調色計算¹⁻⁷⁾へと発展させた。しかしアナログ式の装置では解の精度が低く、自動化効果を得る上でも限度があったため、次第にデジタル式の調色計算装置に中心が移って行った。最も初期のものとして、1966年C. G. Leeteは分光反射率測定値を紙テープに出力し、オフラインで調色計算を行なうシステム⁶⁻²⁾を報告している。1968年H. R. Davidson はアナログ型の装置の経験を生かしてデジタル型の装置 (Comic-II)¹⁻⁸⁾を開発している。1971年村田らは分光光度計とデジタル計算機とをオンラインで結び種々の色彩解析プログラム・ライブラリーを充実した調色計算システム¹⁻⁹⁾を開発した。デジタル型の装置ではアナログ型と比較して自動化効果は高まったが、これらシステムは既存の分光光度計と計算機を組み合わせたものであり、操作性や測定速度など必ずしも自動化効果を十分検討した調色現場むきの装置とはなっていない。

色彩印刷物を判別する技術に関しては、色彩画像認識の立場から一般の認識技術として汎用性を重視した取り組みと、対象物ごとにその個有の特徴を捕らえ判別方式や装置を極力簡略化して実用性を重視した取り組みの二つがある。前者については1977年伊藤が大型計算機と種々の色彩画像入力装置との組み合わせからなる色彩図形認識システムを開発し、カラー航空写真の認識や眼底写真の認識処理への応用⁷⁻²⁾を報告している。この装置は非常に大規模なものであり、かつ色彩画像の多量の情報を忠実に処理する方式を取っているため多くの処理時間を要し、自動化装置にそのまま適用できるものではない。後者の取り組みの代表例として1972年津上は色彩図柄を有する紙幣など印刷紙片の判別装置¹⁻⁵⁾を報

告している。これは色彩紙片の定点の色を検出し、その分布状況に応じて判別するものであるが、定点測定法であるため移動物体の高速判別が困難であり、汎用性にも欠けていた。多様な色彩印刷物判別にも適用できる高い汎用性と、自動化効果が十分得られるほどの高速性を兼ねそなえた判別方式が課題である。

1. 4 本論文の内容概説

本論文は、フォトダイオードを使用して物体色を高速高精度に測定する方法と、これを応用した調色計算装置や色彩印刷物判別装置など色彩を扱う業務の自動化・省力化装置の構成方法について述べている。すなわち、本論文ではまずシリコン・フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合の誤差要因について詳細に解明し、これを基礎としてフォトダイオード一次元配列を使用して物体色を分光反射率値として高速高精度に測定する方法、およびシリコン・フォトダイオードと色フィルタおよびミラーボックスの組み合わせにより色分解受光モジュールを構成して物体色の三刺激値を高速高精度に測定する方法を示した。次に分光反射率測定を産業的な分野に応用する主要な例として調色計算を取り上げ、調色過程における色合せ評価作業を計算機でシミュレーションする方法をまず開発し、これを使用して種々の調色計算の基礎的要因を検討するとともに調色計算装置のハードウェア、ソフトウェアの構成方法を明らかにした。さらに二次元的に分布する色彩情報を効率良く解析するための色彩画像解析システムの構成方法を明らかにし、これを活用して開発した色彩印刷物の判別方式と銀行券整理機について述べている。

本論文は九章から構成され、それぞれの章は相互に図1-1に示す関係にある。第二、三、四章はフォトダイオードを応用した物体色測定技術に関する研究、第五、七章は色彩解析ツールに関する研究、第六、八章は自動化装置への適用に関する研究である。

第一章では本論文の背景を述べ、物体色の測定と、自動化への適用における問題点を整理し、研究開発課題について展望している。

第二章では物体色測定用の受光器、特に産業応用に適した測色用受光器としてシリコン・フォトダイオードに注目し、測光精度を理論的に解析するとともに精密測色用受光器として使用する場合の使用限界を明らかにしている。この章は続く三章、四章の基礎となる章である。

第三章ではフォトダイオード一次元配列を使用した高速分光測定器を開発検討し、それ

を用いて物体色の分光反射率データを高速かつ高精度に計算機に入力する方式を述べている。ここで明らかにする高速分光測定技術は、第六章で述べる調色計算装置の有効な構成要素となる。

第四章ではフォトダイオードと色フィルタおよびミラーボックスを組み合わせて物体色の三刺激値を効率良く測定する色分解受光モジュールについて述べ、その最適設計方法を明らかにしている。この色分解受光モジュールは第八章で述べる色彩印刷物判別装置の中に効果的に使用される。

第五章では色彩情報処理の一つの重要な課題である調色自動化について、その基礎的な事項を解析するための計算機シミュレーション方式を確立し、第六章のための準備として具体的な二三の問題についてシミュレーションによる解析を行っている。

第六章では物体色測定装置と計算機の結合により実現した調色計算装置について述べている。二定数理論を基礎にした調色計算ソフトウェアの内容と、干渉フィルターを使用した分光光度計および色材指定が容易にできる操作盤など、調色計算に適したハードウェアの内容について論じ、染色分野に適用した場合の実験データをもとに調色計算装置の有効性を示している。

第七章では色彩画像を会話的に効率良く解析処理するシステムの構成方法を述べている。色彩画像では対象となる色彩情報が膨大であるから、自動化装置等を実現する場合には、あらかじめ対象色彩画像を十分に分析し、処理方式の検討が重要である。この場合効率の良い色彩画像解析システムが重要である。この章ではその解析システムを構成する高速画像処理装置および画像解析・色彩解析のためのソフトウェアについて述べている。

第八章では銀行券を具体例とした色彩印刷物判別方式と、これを用いた銀行券整理機について述べている。まず第七章で構成した色彩画像解析システムを活用し、色彩画像としての銀行券を種々の面から分析し、色彩印刷物の種類判別方式、正否判別方式を確立した。次にこれを応用して銀行券検査業務を自動化するための銀行券整理機の構成方法を示した。

第九章は以上の各章の結果を整理した本論文のまとめである。

本研究を通じて、フォトダイオードを使用して物体色を高速高精度に測定する技術が明らかになった。さらにこれら測色装置と計算機を組み合わせ、種々の色彩情報処理方式を確立し、調色計算装置、色彩印刷物判別装置など従来人間の視感にたよっていた業務を自動化することに道を開くことができた。

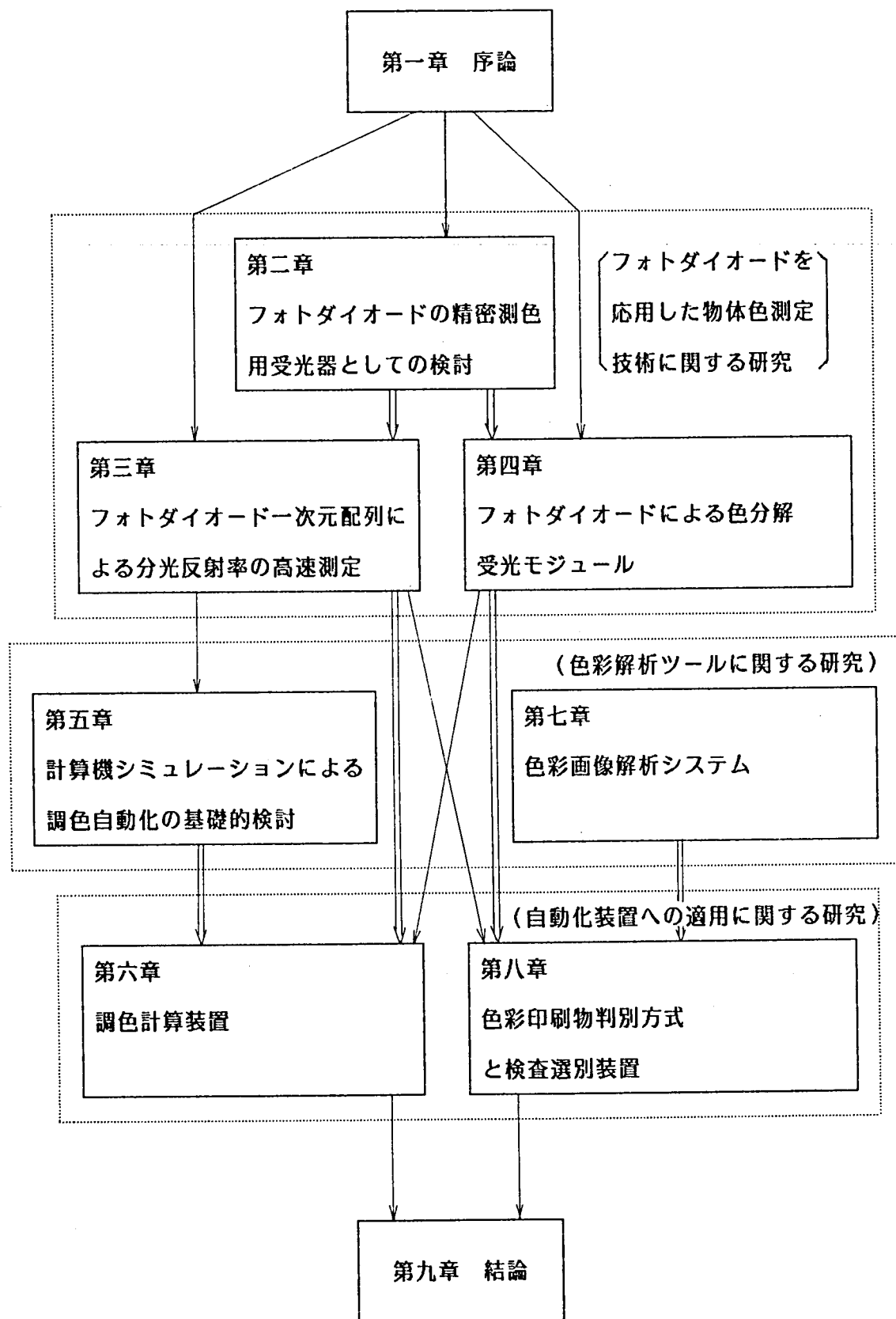


図1-1 本論文の展開と各章の相互関係

第二章 フォトダイオードの精密測色用受光器としての検討³⁻⁷⁾

2. 1 はじめに

受光器には光電子増倍管に代表される光電子放出型受光器、CdSに代表される光導電型受光器、フォトダイオードに代表される光起電力型受光器など多くの種類の受光器があり、それぞれ長所・短所がある。産業応用を主目的とする物体色測定装置を開発する際には、受光器に対して次の事からを検討する必要がある。

- 1) 感度・精度：人間の目の色識別能力に相当する測色を行うためには高い精度の測定（誤差 0.1%程度以下）が必要であり、感度と精度の良い受光器が不可欠である。
- 2) 分光感度：可視波長範囲全域にわたって感度を持つことが最低限必要である。分光感度曲線が可視波長範囲で平坦で温度変動も少ないことが望ましい。
- 3) 応答速度：自動化装置など産業応用では測色速度がシステム全体の性能を左右する。高い応答速度（通常の測色用途では最高1MHz程度）が要求される。
- 4) 動作電圧：低い電圧（10V程度以下）で動作し、IC・LSI などとの親和性が良い事が望まれる。
- 5) 安定性・寿命：感度劣化や特性変動が少なく、機械的振動や熱に対して強く長寿命である事が望まれる。
- 6) 形状・価格：受光器と付属装置ができるだけ小型であり、配列や円形・矩形など目的に応じた形状が容易に作れる事が望まれる。測色のためには一般に複数の受光器を使用するから受光系の価格も選択の重要な要因となる。

フォトダイオードは直線性がすぐれ特性の安定した半導体受光器²⁻⁵⁾であり上記の事からを総合的に考えると、産業応用の測色用受光器として非常にすぐれていると言える。しかし感度については光電子増倍管と比較して雑音等価電力が2桁程度劣るように、感度限界いっぱいで使用しなければならない場合がしばしば生じる。

このようなフォトダイオードを誤差 0.1%程度以下の高精度受光器として使用するためには、受光器、増幅器、AD変換器などから構成する光電計測系の誤差要因を詳細に把握し、系の最適設計が重要となる。フォトダイオード単体の特性はすでに色々の角度から明らかにされているが、^{2-3), 2-5)} 測色用受光器としての総合的で詳細な検討は必ずしも十

分に行なわれていない。本章ではフォトダイオードを使用した光電計測系の誤差要因を検討し、測光精度を理論的に解析するとともに、高い測色精度を得るための光電計測系の構成方法を明らかにする。

2. 2 フォトダイオードの基本的特性

2. 2. 1 等価回路と光電変換系の構成

フォトダイオードはシリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、ガリウム砒素リン(GaAsP)などを材料としたものが実用に供されているが、分光感度特性などから見て測色用としてはシリコンによるものが適しているから、ここではシリコン・フォトダイオードを中心に検討する。

フォトダイオードは使用する材料により大まかな特性が決まるが、製法や構造の差によっても特性に差が表われ、何種類かの型に分けられる。図2-1に代表的な4種類の型を示す。²⁻¹¹⁾

- 1) プレーナ拡散型：P-N接合の端面を SiO_2 で覆ったもので低暗電流であることが特徴である。
- 2) 低容量プレーナ拡散型：プレーナ拡散型を改善し、N型半導体に不純物濃度の低い高抵抗型を使用することにより、空乏層を大きくして接合容量を小さくすることにより、立上り時間を1/10以上に改善したものである。またP層が特に薄く作られているため短波長域にも高い感度が得られる。
- 3) PNN^+ 型：低抵抗率の N^+ 半導体層を厚くし、 $\text{N}-\text{N}^+$ 界面を空乏層近くまで持ってきたものである。これにより赤外波長域の感度が一部カットされるため、短波長の測定に有利である。
- 4) PIN 型：低容量プレーナ拡散型の改良であり、P層とN層の間に特に抵抗の大きいI層を作り応答速度を早めたものである。耐圧や漏えい電流などの特性が改善されるため、逆電圧を印加して高速動作させることができる。

以上のようにフォトダイオードはいく種類かの型に分けられるが、基本的な構造は同じであり、その等価回路は図2-2のように表わされる。²⁻⁴⁾

フォトダイオードが信号光 ϕ_1 を受けた時の出力電流 I_s は等価回路図2-2から、

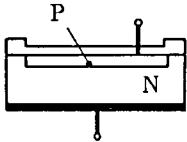
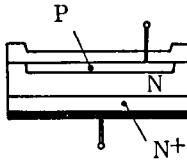
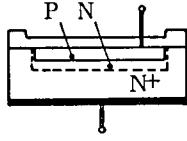
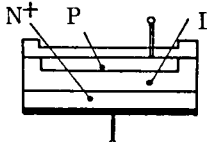
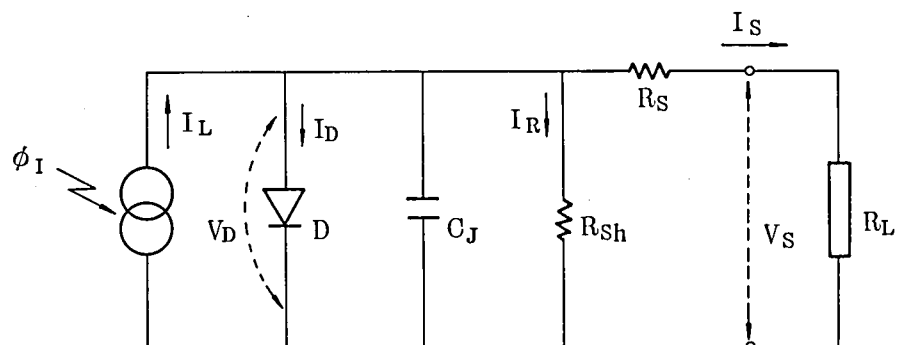
種 類	構 造	特 長
プレーナ 拡散型		<ul style="list-style-type: none"> • 低暗電流
低容量 プレーナ 拡散型		<ul style="list-style-type: none"> • 低暗電流 • 高速応答 • 高紫外感度 • 高赤外感度
PNN ⁺ 型		<ul style="list-style-type: none"> • 低暗電流 • 高紫外感度
PIN 型		<ul style="list-style-type: none"> • 超高速応答

図 2 - 1 フォトダイオードの種類と構造



ϕ_I : 入射信号光
 I_L : 入射光による発生電流
 I_D : ダイオード電流
 V_D : ダイオード両端の電圧
 C_J : 接合容量
 R_{Sh} : 並列抵抗
 R_S : 直列抵抗
 I_R : 並列抵抗電流
 I_S : 出力電流
 V_S : 出力電圧
 R_L : フォトダイオード負荷

図 2 - 2 フォトダイオードの等価回路

$$I_S = I_L - I_0 \{ \exp(q V_D / k T) - 1 \} - V_D / R_{sh} \quad \dots (2-1)$$

ただし、記号 I_L 、 V_D 、 R_{sh} は図 2-2 の記号と同じ。

I_0 : フォトダイオードの逆方向飽和電流

q : 電子電荷 (1.6×10^{-19} [C])

k : ボルツマン定数 (1.4×10^{-23} [J/K])

T : 素子の絶対温度

となる。開放電圧 V_{OP} は $R_L = \infty$ で $I_S = 0$ の時の出力電圧であり、

$$V_{OP} = k T / q \cdot \ln \{ (I_L - I_R) / I_0 + 1 \} \quad \dots (2-2)$$

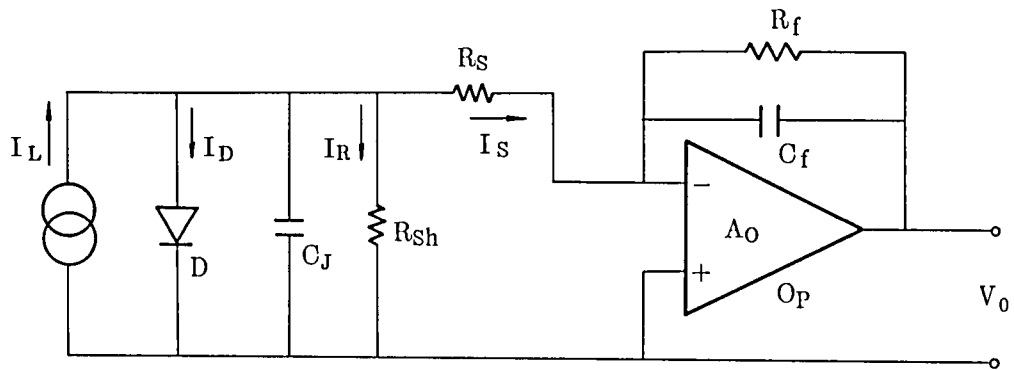
と表わされる。 V_{OP} は周囲温度 (T) の影響を直接受ける値であるから、精密測光量として必ずしも適当でない。式 (2-1) において光電流 I_L は信号光 ϕ_I に比例した値であり、第二項はダイオードに流れる誤差電流、第三項は並列抵抗に流れる誤差電流であるが、以下に述べる様にこの誤差電流を十分に小さくおさえる事ができるので、出力電流 I_S は精密測光量として適している。

信号光 ϕ_I と光電流 I_S との比例関係の良い受光器とするためには、式 (2-1) の第二項および第三項の値を極力小さくする様な使い方、すなわち、出力電圧 V_S ができるだけ小さくなる状態で使用する事、が重要である。具体的にこれを実現するには開ループゲインが十分大きく、入力インピーダンスが十分大きい演算増幅器により、電流電圧変換回路を構成して短絡に近い状態で光電流を取り出せば良い。²⁻⁶⁾ フォトダイオードと演算増幅器を組み合わせる光電変換系の等価回路は図 2-3 となる。この等価回路で示される光電変換系による測光精度は 3 節で詳細に検討する。

フォトダイオードを精密受光器として使用するためには演算増幅器との組み合わせが不可欠であり、したがってフォトダイオードの性能だけでなく演算増幅器の性能が光電変換系の性能を大きく左右する。以下本章で光電変換系の性能を定量的に検討する場合には、付表 2-1 に示した代表的な演算増幅器を例に取り検討する。

2. 2. 2 分光感度特性

フォトダイオード分光感度の長波長側の限界波長は PN 接合面のバンド・ギャップで決り、シリコンでは約 1100nm が長波長側の限界となる。短波長側は表面の接合層における吸収により限界波長が決る。接合層が薄い構造のものは短波長側の感度が高くなり、限界波長も短い方に伸びている。短波長側の感度限界は一般のもので 300~400nm、特に接合層



O_P : 演算増幅器

A_O : 演算増幅器の開ループゲイン

R_f : 帰還抵抗

C_f : 位相補償用コンデンサ

V_O : 出力電圧

(他の記号は前図図 2 - 2 と同じ)

図 2 - 3 フォトダイオードと演算増幅器からなる
光電変換系の等価回路

を薄くしたもので 200nm まで感度が有る。フォトダイオードは半導体素子材料の種類で大きな分光感度特性が決るが、PN 接合の深さや空乏層の幅など構造によってもかなり分光感度の差が生じる。2. 2. 1 項に述べた 4 種類のフォトダイオードについて分光感度例およびその温度特性例を図 2-4 に示す。²⁻¹¹⁾ いずれの型のフォトダイオードも可視波長範囲(380nm~780nm)において感度を持つが、短波長側の感度が相対的に高い低容量プレーナ拡散型と PNN⁺ 型が、色分解受光を行うには好都合である。

シリコンの光吸収係数およびバンド・ギャップは温度により変化するからシリコン・フォトダイオードの分光感度特性も温度により変化する。各型の分光感度の温度係数例を図 2-4 の中に示した。シリコンの光吸収係数は温度に対して正の変化を示し、バンドギャップは負の変化を示すから、一般にシリコン・フォトダイオードでは温度上昇とともに長波長側の感度は増加し、短波長側の感度は減少する傾向にある。²⁻¹⁾ 接合層が深い構造のもの(プレーナ拡散型など)では短波長側の感度低下が大きく、長波長側の感度上昇とかさなって温度上昇とともに相対的に分光感度曲線が長波長側にずれ、近似的に最大感度を示す波長が 0.4nm/℃ の割でずれる。²⁻²⁾ この場合 ±30℃ の温度変動を考えれば分光感度曲線のずれが ±12nm 程度になり精密測色を行う場合には測定誤差の原因となる。接合層の浅い構造のもの(低容量プレーナ拡散型など)では短波長域まで光吸収損失が小さくなっているから、短波長側の感度の温度係数も小さい。図 2-4 に示す感度係数からも明らかに、接合層の浅い構造のものでは可視波長域(380nm~780nm)での感度の温度係数はほぼゼロであり温度に対して安定した分光感度特性が得られ、したがってこの型のフォトダイオードは高精度の測色を行なうのに適している。

2. 2. 3 応答速度

フォトダイオードの応答特性を決める要因は、空乏層中のキャリアの走行時間、接合容量、素子の内部抵抗、負荷抵抗である。一般に空乏層中でのキャリア走行時間は 10 n sec 以下であり、物体色測定のように 1 MHz 程度以下の周波数帯域で使用する場合にはキャリア走行時間の影響は完全に無視できる。この時フォトダイオードの応答速度は接合容量、素子の内部抵抗、負荷抵抗で決まり、立上り時間 t_r は図 2-2 の等価回路から次式で表わされる。

$$t_r = 2.2 \tau = 2.2 C_j R_{sh} (R_s + R_L) / (R_{sh} + R_s + R_L) \quad \dots (2-3)$$

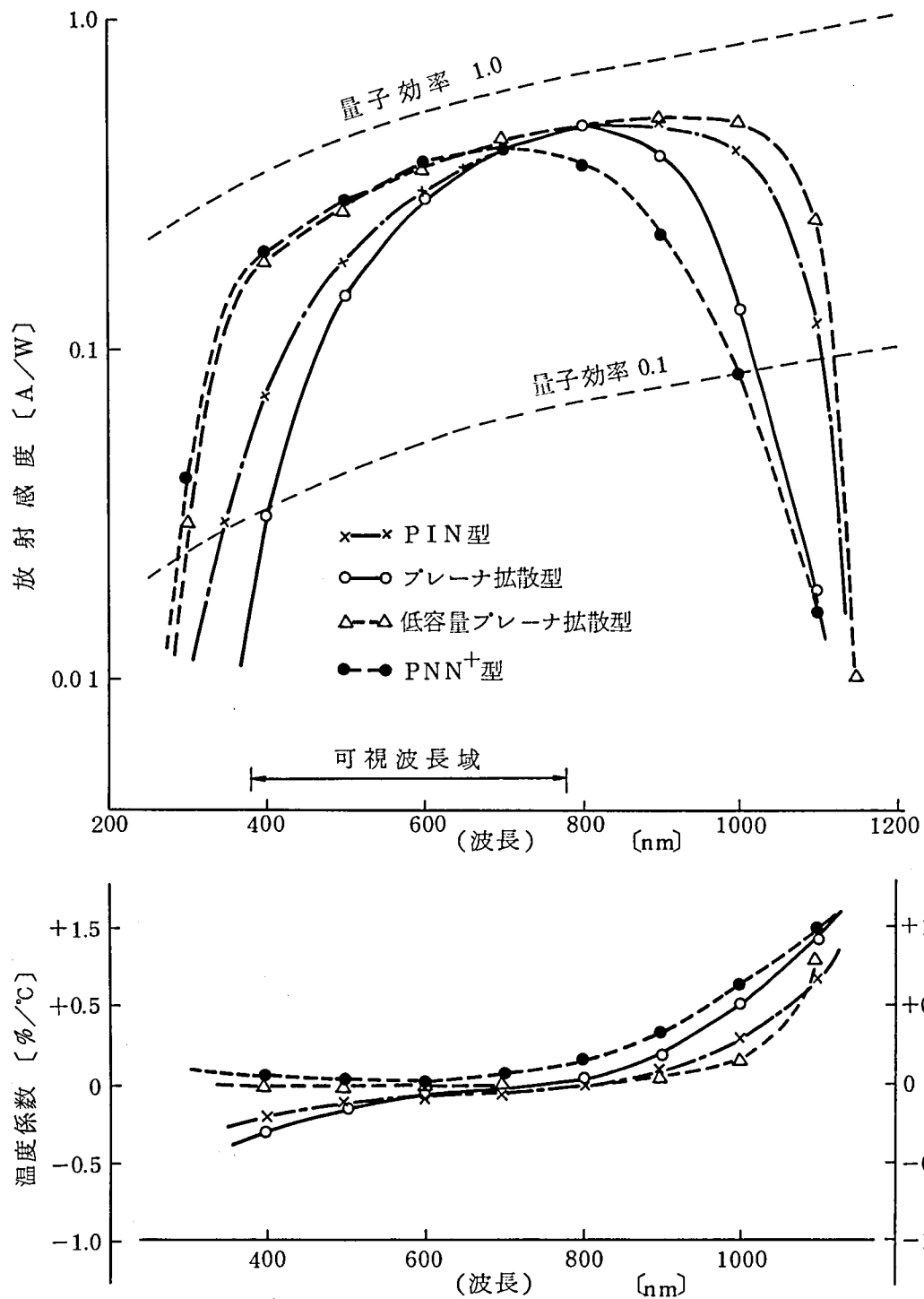


図 2 - 4 シリコン・フォトダイオードの分光感度特性例
および温度係数の例

ただし、 τ ：時定数

t_r ：立上り時間、信号が10%点から90%点に達する時間。

精密測定に使用する場合は演算増幅器を用いて短絡電流型で使用するから、一般に

$R_{sh} \gg R_L \gg R_S$ と見なせる。したがって応答速度は近似的に

$$t_r = 2.2 R_L \cdot C_j$$

となる。フォトダイオードの接合容量 C_j は有効受光面積 (S_0) に比例し、逆バイアス電圧 V_R の平方根に反比例する。4種類の構造のフォトダイオードについて接合容量の例(単位受光面積当りの接合容量)を表2-1に示す。²⁻¹¹⁾ 逆バイアス電圧の印加で数倍～十倍応答速度の向上が可能であるが、反面暗電流による精度低下が大きいから、測色用途は一般に逆バイアスは好ましくない。表2-1から明らかであるが、低容量プレーナ拡散型はPIN型を除く他の型の接合容量と比較して小さく、逆バイアスを加えないとするとPIN型の接合容量と差が無い。応答速度の点から見ると低容量プレーナ拡散型が測色用受光器として適している。

代表的な低容量プレーナ拡散型フォトダイオードについて、有効受光面積をパラメータに取った場合の立上り時間(および応答周波数限界)を図2-5に示す。

フォトダイオードと色ガラスフィルタを組み合わせる三色分解受光器 (D_R 、 D_G 、 D_B) を構成する場合、組合せ色フィルタの透過率の差に加え、照明光源(たとえば標準の光Aとみなせるハロゲンランプ)の分光放射強度分布の片寄りにより波長域間の感度差が大きくなる。標準白色面からの反射光を受光した時に各波長域出力 V_{OR} 、 V_{OG} 、 V_{OB} が同一になる様に負荷を決めると、典型的な三色分解受光器 D_R 、 D_G 、 D_B の応答速度は図2-5の中に示す様になる。(ただし、受光器の有効受光面積は 33mm^2 とした) この例では波長域間の応答速度の差が10倍程度もある。一般に色分解受光系では波長域間の応答速度の差はかなり大幅であり、最低の応答速度を示す波長域の受光器が色分解受光系全体の応答速度を決める。

フォトダイオードを産業的な用途に使用する場合、分光感度・応答速度などの面から低容量プレーナ拡散型が精密測色デバイスとして適している。以下測定精度などを定量的に検討する場合には、低容量プレーナ拡散型を具体例にして検討する。代表的な低容量プレーナ拡散型フォトダイオードの諸特性を付表2-2に示す。

表 2-1 代表的なフォトダイオードの接合容量

フォトダイオードの種類	単位受光面積当りの接合容量 [PF/mm ²]
プレーナ拡散型	97.0～ 138.0
低容量プレーナ拡散型	10.7～ 12.1
PNN ⁺ 型	39.4～ 42.9
PIN 型	0.7～ 1.9 (但し 20V～100Vの逆バイアス電圧印加)

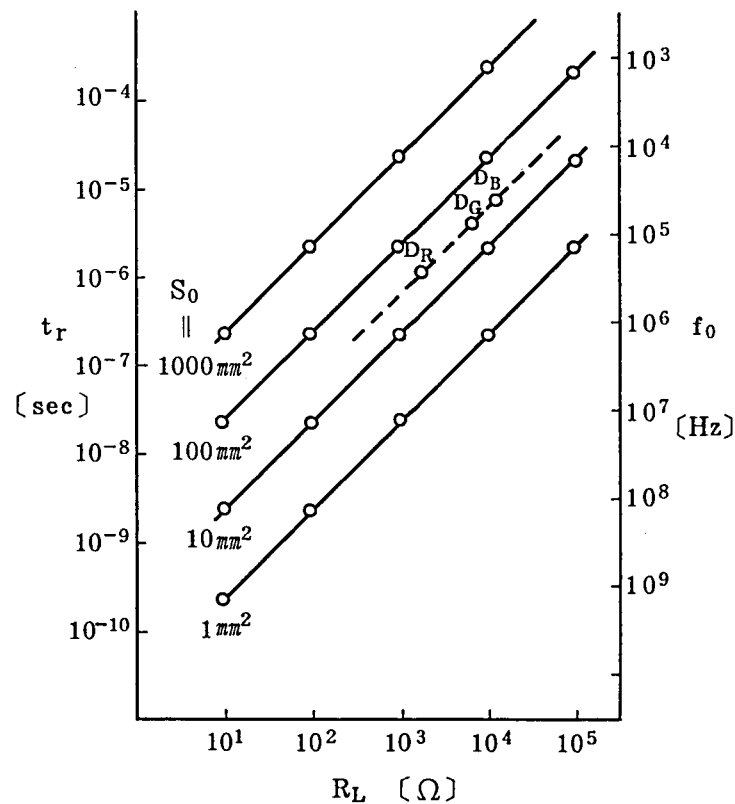


図 2 - 5 低容量プレーナ拡散型フォトダイオードの立上り時間 (t_r) と応答周波数限界 (f_0)

2.3 フォトダイオードによる測光精度

図2-3の等価回路で表わされる光電変換系の主な測定誤差要因は(1)光電流出力の非直線誤差、(2)交流成分雑音による誤差、(3)直流成分雑音による誤差、である。ここではこの三種の誤差について詳細に検討する。

2.3.1 光電変換系の非直線誤差

フォトダイオードと演算増幅器からなる系の出力電流(I_s)は式(2-1)で表わされるが、ダイオードに流れる電流 I_D が非直線誤差の原因となる。出力電流の非直線誤差 E_{LN} は次式で表わされる。²⁻⁷⁾

$$E_{LN} = \frac{100I_0 [(R'/V_t) - \{\exp(I_s R'/V_t) - 1\}/I_s]}{1 + R'/R_{sh} + (I_0/I_s) \{\exp(I_s R'/V_t) - 1\}} \quad \dots (2-4)$$

ただし、 E_{LN} : 光電流出力(I_s)の非直線誤差[%]

$R' = R_s + R_L = R_s + R_f/A_0$: フォトダイオードの実効負荷

$V_t = kT/q$ (室温で $V_t = 0.026$)

他の記号は図2-2, 図2-3, 式(2-1)と同じ。

図2-3において出力電圧 V_0 は演算増幅器のダイナミック・レンジの制限を受け、代表的な演算増幅器のもとでは

$$V_0 = I_s \cdot R_f \leq 10 \quad [V] \quad \dots (2-5)$$

さらに、

$$I_s \cdot R'/V_t \div I_s \cdot R_L/V_t = I_s R_f / (V_t A_0) \ll 1.0$$

したがって、式(2-4)において $\exp(I_s R'/V_t)$ を二次項まで近似すれば、

$$E_{LN} = 100I_0 (I_s R'^2 \beta^2 / 2) \cdot \{1 + R'/R_{sh} + I_0 (R' \beta + I_s R'^2 \cdot \beta^2 / 2)\}^{-1} \quad \dots (2-6)$$

ただし、 $\beta = 1/V_t$ (室温で $\beta = 38.5$)

受光面積 $10\text{mm}^2 \sim 100\text{mm}^2$ の低容量プレーナ拡散型フォトダイオードでは $I_0 < 10^{-6}\text{A}$, $R_{sh} > 10^6 \Omega$ であるから、 E_{LN} のオーダーは式(2-6)の分子で決る。 R' と I_0 をパラメータに取り、出力電流の非直線誤差を図示すると図2-6となる。非直線誤差に関し、 I_s , I_0 は線形に影響し、 R' は二乗で影響が表われるから、光電計測系の非直線誤差を小さくおさえ、精度良く測光を行うためには実効負荷 R' を極力小さくする事が重要と

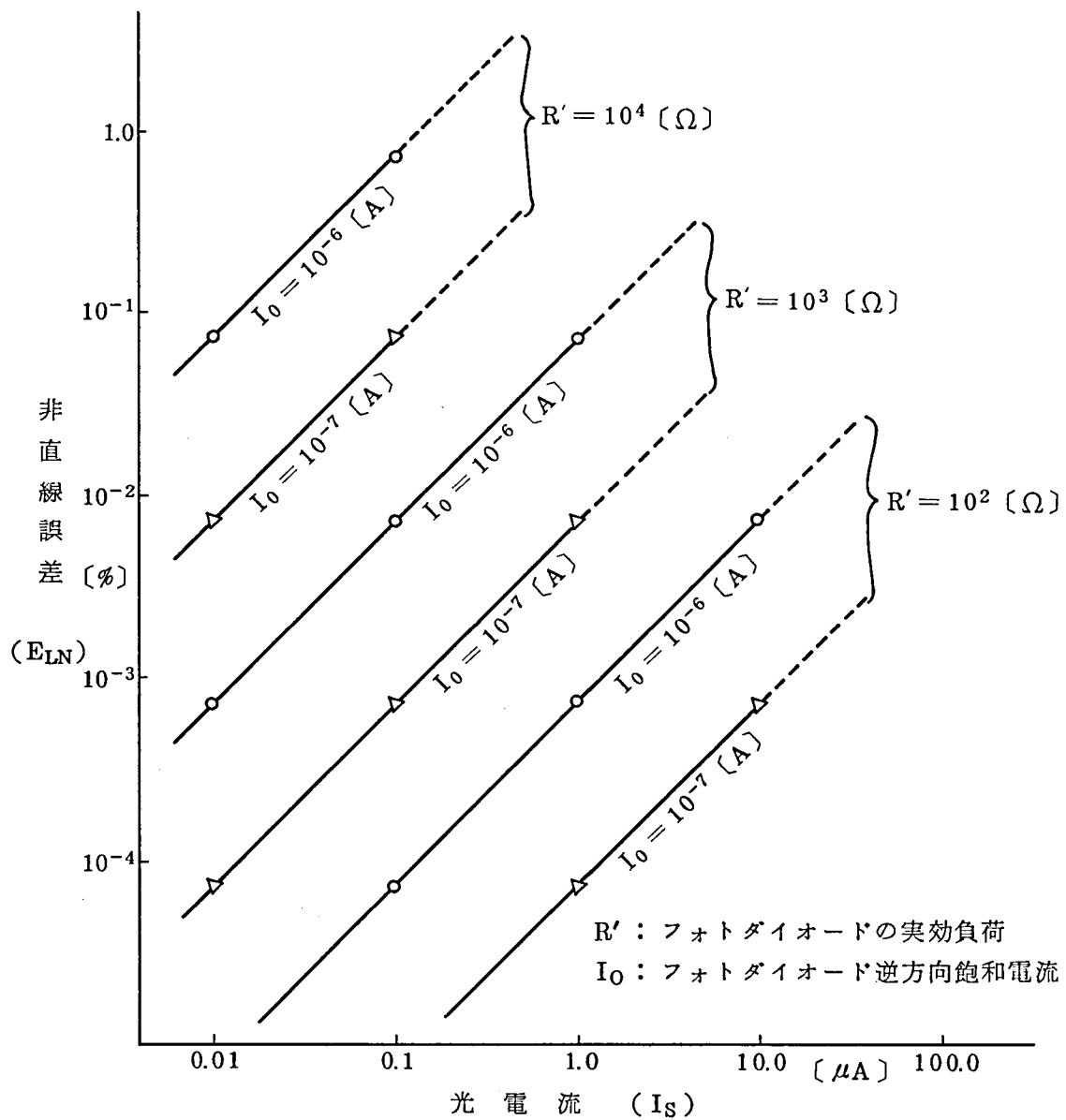


図 2 - 6 光電流出力 (I_S) と非直線誤差 (E_{LN}) の例

なる。図2-6からわかるように、実効負荷を1 kΩ以下に取る時、光電流出力の非直線誤差は0.1%以下である。

2.3.2 交流成分雑音による誤差

図2-3の等価回路で表わされる光電変換系の雑音は熱雑音などの交流成分雑音とドリフトなどによる直流成分雑音に分けられる。まず、交流成分雑音による測光誤差について検討する。フォトダイオードを無バイアスで光起電力モードで使用する場合、変換系の等価回路は図2-3で表わされているが、フォトダイオードの直列抵抗 R_s は並列抵抗 R_{sh} に比較して非常に小さいから、抵抗 R_s の熱雑音を無視する。この時、光電変換系の主な雑音源は次の5要因となる。^{2-8), 2-9)}

$i_{dnt} = (4kTB/R_d)^{1/2}$: フォトダイオード等価抵抗 $R_d (=R_{sh})$ の熱雑音

$i_{dns} = (2qI_s B)^{1/2}$: フォトダイオード光電流(I_s)のショット雑音

$e_{fn} = (4kTBR_f)^{1/2}$: 帰還抵抗 R_f の熱雑音

i_{in}, e_{in} : 演算増幅器の入力換算電流雑音及び入力換算電圧雑音

ただし、 k はボルツマン定数(1.4×10^{-23} [J/K]), T は絶対温度([K]), q は電子電荷(1.6×10^{-19} [C]), B は帯域幅([Hz])である。フォトダイオードの等価抵抗 R_d は光電流 I_s の関数であるが、精密受光器として使用する場合には一般に非常に小さい光電流範囲($I_s < 10^{-4}$)で使用するから $R_d(I_s) = R_d(0)$ と見なせる。以上の雑音源を考慮した光電変換系の等価回路は図2-7となる。この時、光電変換系全体の出力雑音 e_N は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} e_N &= \{(e_{in}R_f/R_d)^2 + (i_{dnt}^2 + i_{dns}^2 + i_{in}^2)R_f^2 + e_{fn}^2\}^{1/2} \\ &= R_f \{(e_{in}/R_d)^2 + 4kTB/R_d + 2qI_s B + i_{in}^2 + 4kTB/R_f\}^{1/2} \end{aligned} \quad \dots (2-7)$$

他方光電流出力 I_s による信号出力 V_0 は

$$V_0 = I_s \cdot R_f \quad \dots (2-8)$$

したがって交流成分雑音による測光誤差 E_{AC} [%] は

$$\begin{aligned} E_{AC} &= 100 \cdot e_N / V_0 \\ &= 100 \{(e_{in}/R_d)^2 + 4kTB/R_d + 2qI_s B + i_{in}^2 + 4kTB/R_f\}^{1/2} \\ &\quad \cdot I_s^{-1} \end{aligned} \quad \dots (2-9)$$

図2-3の光電変換系の典型的な動作状態を設定し、この状態における5要因による交

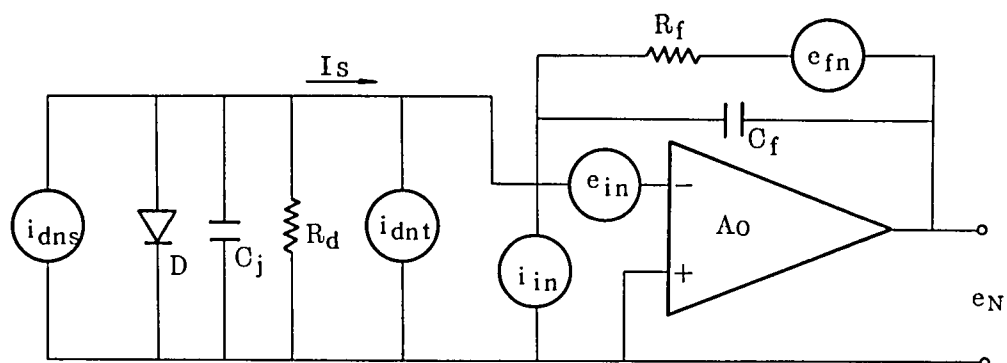


図 2 - 7 フォトダイオードと演算増幅器からなる
光電変換系の雑音源等価回路

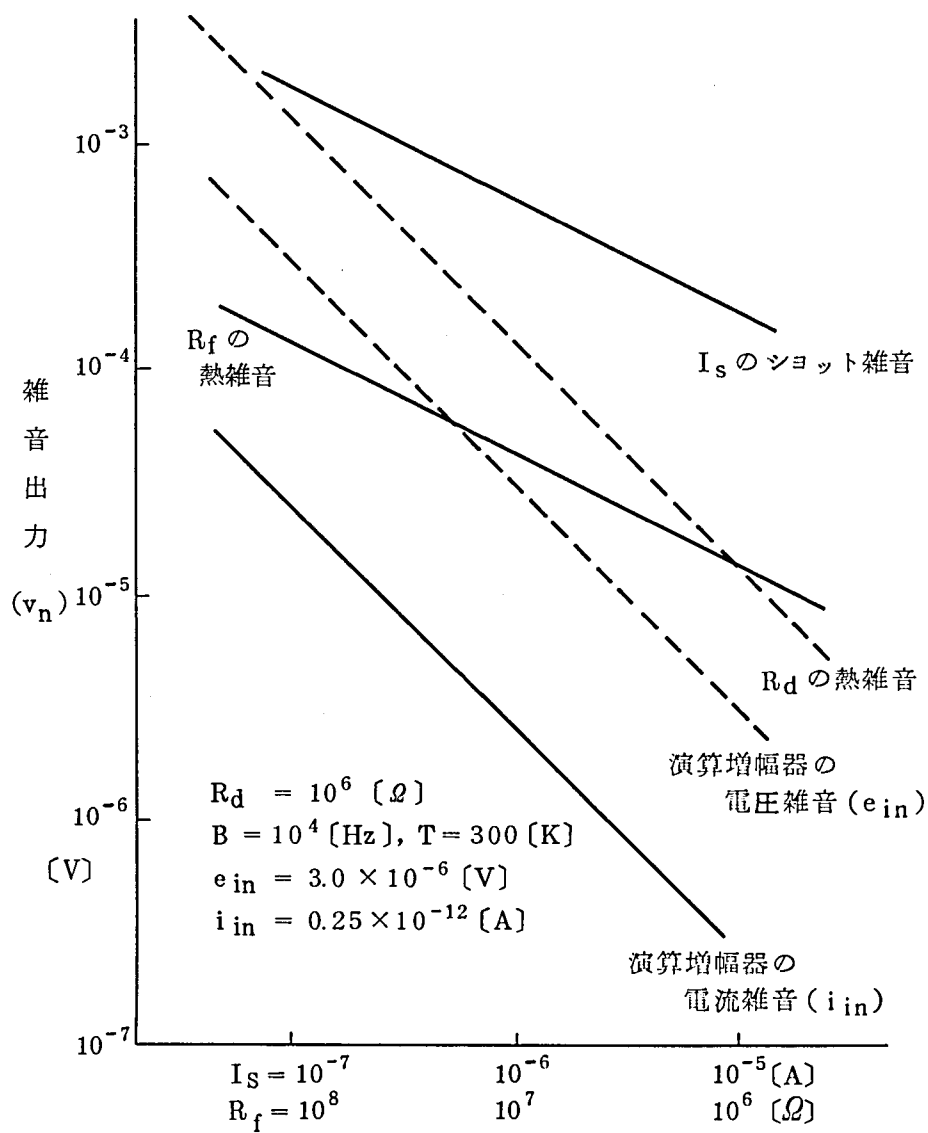


図 2 - 8 光電変換系における要因ごとの雑音出力例

流成分雑音出力を図2-8に示す。フォトダイオードと演算増幅器とを組み合わせた系では、計測する光電流 I_s の最高値と帰還抵抗 R_f とは反比例の関係にあるから図2-8に示す典型的な動作状態では $I_s \cdot R_f = 10$ の制限を設けた。他のパラメータの設定値は図2-8の中に示した。この図からわかるように、大きい光電流、低負荷 ($I_s > 10\mu A$, $R_f < 1M\Omega$) の状態では光電流 I_s のショット雑音が交流成分雑音の大勢を決める。小さい光電流・高負荷 ($I_s < 0.1\mu A$, $R_f > 100M\Omega$) の状態ではフォトダイオード等価抵抗 (R_d) の熱雑音と I_s のショット雑音が主要な交流成分雑音である。光電流出力 (I_s) を変数とし、帰還抵抗 (R_f) と帯域幅 (B) を補助変数とした時の交流成分雑音による誤差 E_{AC} を図2-9に示す。 I_s の増加にほぼ反比例して E_{AC} が減少する。 B の増加に対しては $1/2$ 乗に比例して E_{AC} が増加するが、 R_f の変化の影響は小範囲にとどまっている。 $I_s > 0.01\mu A$, $B < 1KHz$ の条件下では誤差が 0.1% 以下におさまる事が、図からわかる。

2.3.3 直流成分雑音による誤差

オフセット、ドリフトや暗電流など時定数の非常に大きい雑音をここでは直流成分雑音と呼ぶ。直流成分雑音はフォトダイオードに逆バイアス電圧を加えるか、加えないかにより様相が異なる。逆バイアスを加える場合、逆バイアスによる暗電流が直流成分雑音の大勢を決める。逆バイアスを加える主目的は応答速度の改善であるが、反面暗電流の発生やその温度変動などにより測定精度低下が起る。精密測定では精度を第一優先に考え普通無バイアスで使用するから、ここでは逆バイアスを加えない状態について検討する。

フォトダイオードを無バイアスで使用する場合、重要な直流成分雑音は演算増幅器のオフセット及びドリフトである。演算増幅器の直流成分雑音 (V_{off}) は次の4要因に分けられる。

V_{os} : 演算増幅器の入力換算オフセット電圧

$\Delta V_{os}(T)$: 入力換算オフセット電圧の温度変動

I_{os} : 演算増幅器の入力換算オフセット電流

$\Delta I_{os}(T)$: 入力換算オフセット電流の温度変動

図2-3の等価回路に示すように演算増幅器の非反転入力端を接地し、反転入力と非反転入力との間にインピーダンス差がある場合には、入力オフセット電流 I_{os} は演算増幅器バ

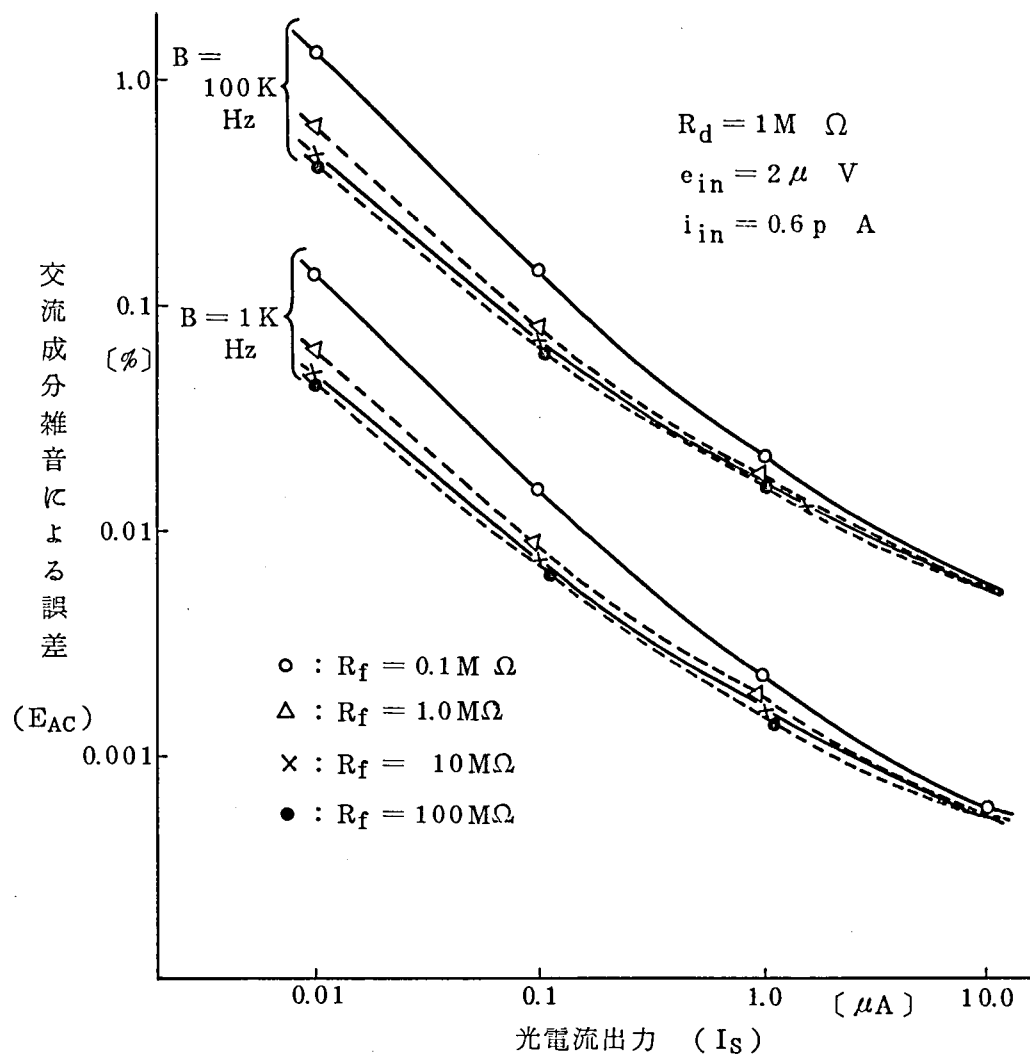


図 2 - 9 光電変換系の交流成分雑音による誤差例

イアス電流 (I_b) と一致する。図 2-3 の光電変換系を温度範囲 $T_0 \pm \Delta T$ のもとで使用するとき、発生するオフセット出力 V_{off} は次式で表わされる。

$$V_{off} = (1 + R_f / R_{sh}) \{ V_{os} + \Delta V_{os} (\Delta T) \} + R_f \{ I_{os} + \Delta I_{os} (\Delta T) \} \quad \dots (2-10)$$

ただし、 T_0 、 ΔT ：フォトダイオード動作の平均温度と温度変動量
一方光電流出力 I_s を得ている時の信号出力 V_0 は $I_s \cdot R_f$ であるから直流成分雑音による計測誤差 E_{DC} [%] は

$$\begin{aligned} E_{DC} &= 100 \cdot V_{off} / V_0 \\ &= 100 [(1/R_f + 1/R_{sh}) \{ V_{os} + \Delta V_{os} (\Delta T) \} + \{ I_{os} + \Delta I_{os} (\Delta T) \}] \cdot I_s^{-1} \quad \dots (2-11) \end{aligned}$$

$$= E_{DC}' + \Delta E_{DC} \quad \dots (2-12)$$

ただし、 E_{DC}' ：温度 T_0 における初期オフセット出力

ΔE_{DC} ：温度変動 ΔT によって生じたオフセット出力

と表わされる。温度 T_0 で初期オフセット調整を行う場合には、誤差は温度変動による ΔE_{DC} のみとなる。オフセット電流の温度特性は、

$$\text{バイポーラ入力段型} : \Delta I_{os} (\Delta T) = -0.015 I_{os} \cdot \Delta T$$

$$\text{FET入力段型} : \Delta I_{os} (\Delta T) = I_{os} (2^{\Delta T/10} - 1)$$

と近似される。²⁻¹⁰⁾ オフセット電圧の温度特性は両タイプともに

$$\Delta V_{os} (\Delta T) = \Delta V_{os} \cdot \Delta T$$

と近似される。付表 2-2 に示した代表的演算増幅器 (バイポーラ入力段型及び FET 入力段型) を例に取り、フォトダイオードによる光電変換系の直流成分雑音による誤差を図示すると図 2-10 となる。バイポーラ入力段型の場合は、FET 入力段型使用の場合と比較して光電変換系の誤差は 100 倍程度となる。精密測光のためには FET 入力段型の演算増幅器がすぐれている。FET 入力段型を使用するとき、直流成分雑音による誤差を 0.1% 以下 ($R_f > 10M\Omega$ 、 $I_s > 0.5\mu A$) にすることは容易である。 $\pm 30^\circ C$ 程度の温度変動を想定するとき、初期オフセットによる誤差 (E_{DC}' ; $T_0 = 25^\circ C$) と温度変動によって生じる誤差 (ΔE_{DC} ; $\Delta T = \pm 30^\circ C$) とはほぼ同程度であり、初期オフセット調整が必ずしも有効でない。

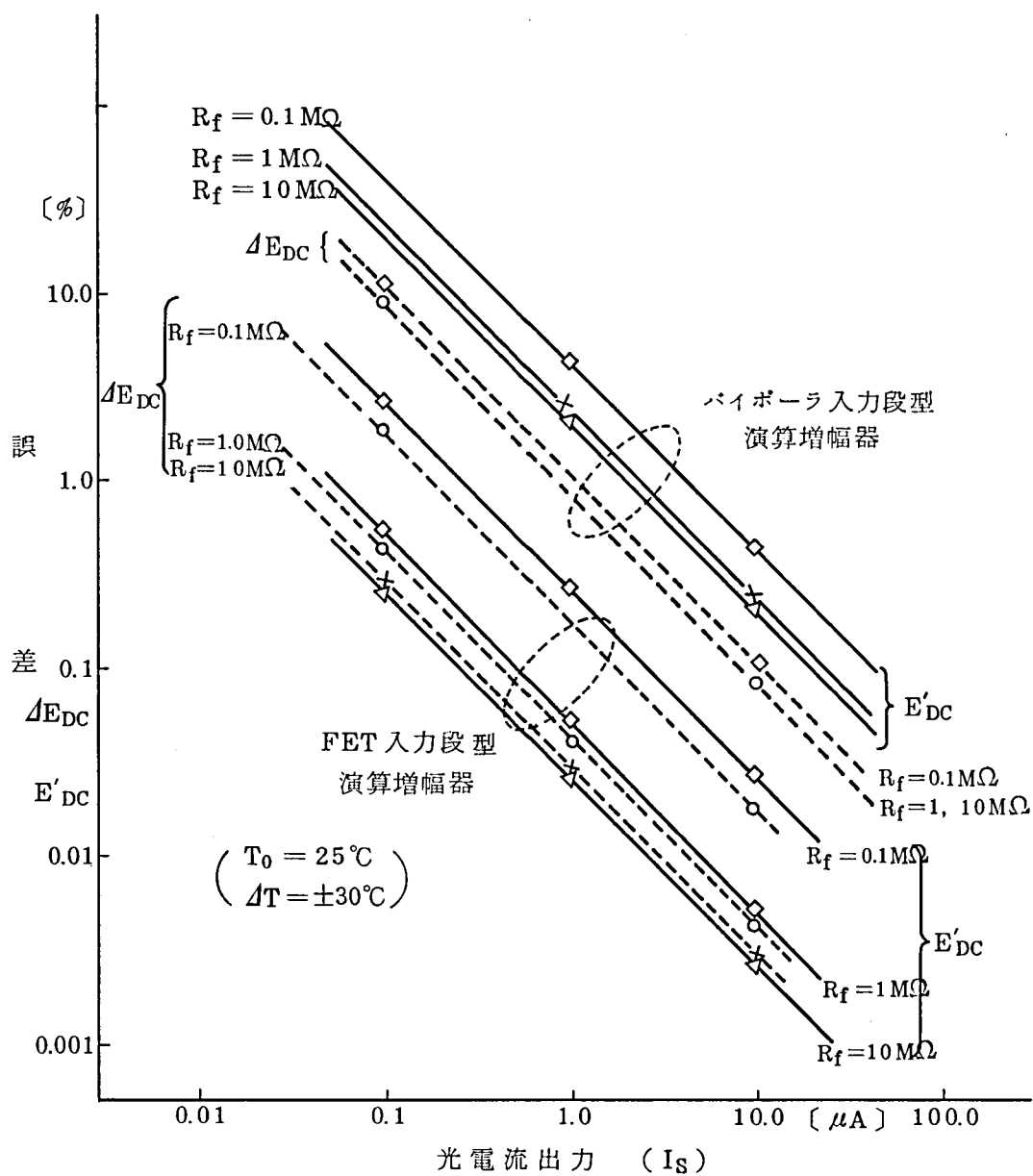


図 2 - 10 光電変換系の直流成分雑音による誤差例

2. 4 デジタル光電測色系の構成と総合誤差

2. 4. 1 デジタル光電測色系の構成

3桁以上の高精度な測光を行うためにはデジタル測定が不可欠であり、A/D変換器との組み合わせが必要である。また色彩測定の場合、一般に複数の受光器を使用するからマルチプレクサー（アナログスイッチ）の使用も必要となる。したがってフォトダイオードを使用したデジタル光電測色系の構成は図2-11となる。

A/D変換系全体の誤差は変換系を構成する個々の要素の誤差の自乗和の平方根となる。すなわち、A/D変換系の主要な誤差要因に注目するとき、

$$E_{AD} = (E_{MPX}^2 + E_{AMP}^2 + E_{SHO}^2 + E_{ADA}^2 + E_{ADQ}^2)^{1/2} \dots (2-13)$$

ただし、 E_{AD} : A/D変換系全体の誤差

E_{MPX} : マルチプレクサー誤差

E_{AMP} : 変換系内蔵増幅器誤差

E_{SHO} : サンプルホールド回路誤差

E_{ADA} : A/D変換器の非直線誤差

E_{ADQ} : A/D変換器の量子化誤差

と表わされる。³⁻³⁾ 代表的なA/D変換系の各誤差要因の公称値を付表2-3に示す。A/D変換系全体の誤差は量子化誤差で大勢が決まるが、付表2-3に示した具体例においては有効10ビットの場合 E_{AD} は0.072%、有効12ビットの場合 E_{AD} は0.022%である。

2. 4. 2 総合誤差

図2-11に示されるデジタル光電測色系の総合誤差は光電変換系の誤差とA/D変換系の誤差の和であるが、それぞれの誤差要因は一般に相関がないから、ここでは個々の誤差の自乗和で総合誤差を表わす。フォトダイオードと演算増幅器を組み合わせた光電変換系の主要な誤差要因は2. 3節に示したように光電流出力の非直線誤差、交流成分雑音による誤差、直流成分雑音による誤差である。したがって、図2-11に示されるデジタル光電測色系の総合誤差は次式で表わされる。

$$E_T = (E_{LN}^2 + E_{AC}^2 + E_{DC}^2 + E_{AD}^2)^{1/2} [\%] \dots (2-14)$$

ただし、 E_T : デジタル光電測色系の総合誤差

E_{LN} : 光電流出力の非直線誤差

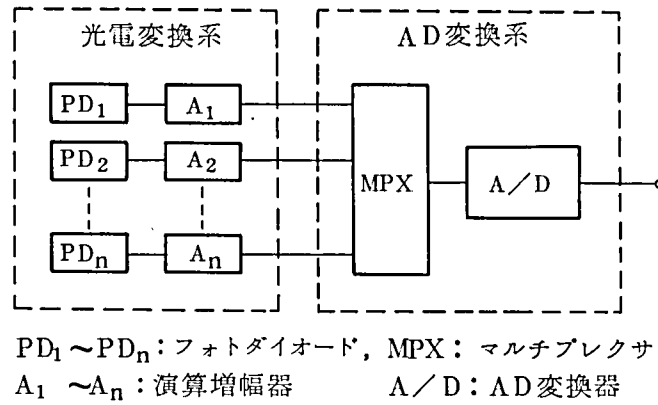


図 2 - 11 フォトダイオードを使用したデジタル
光電測色系の構成図

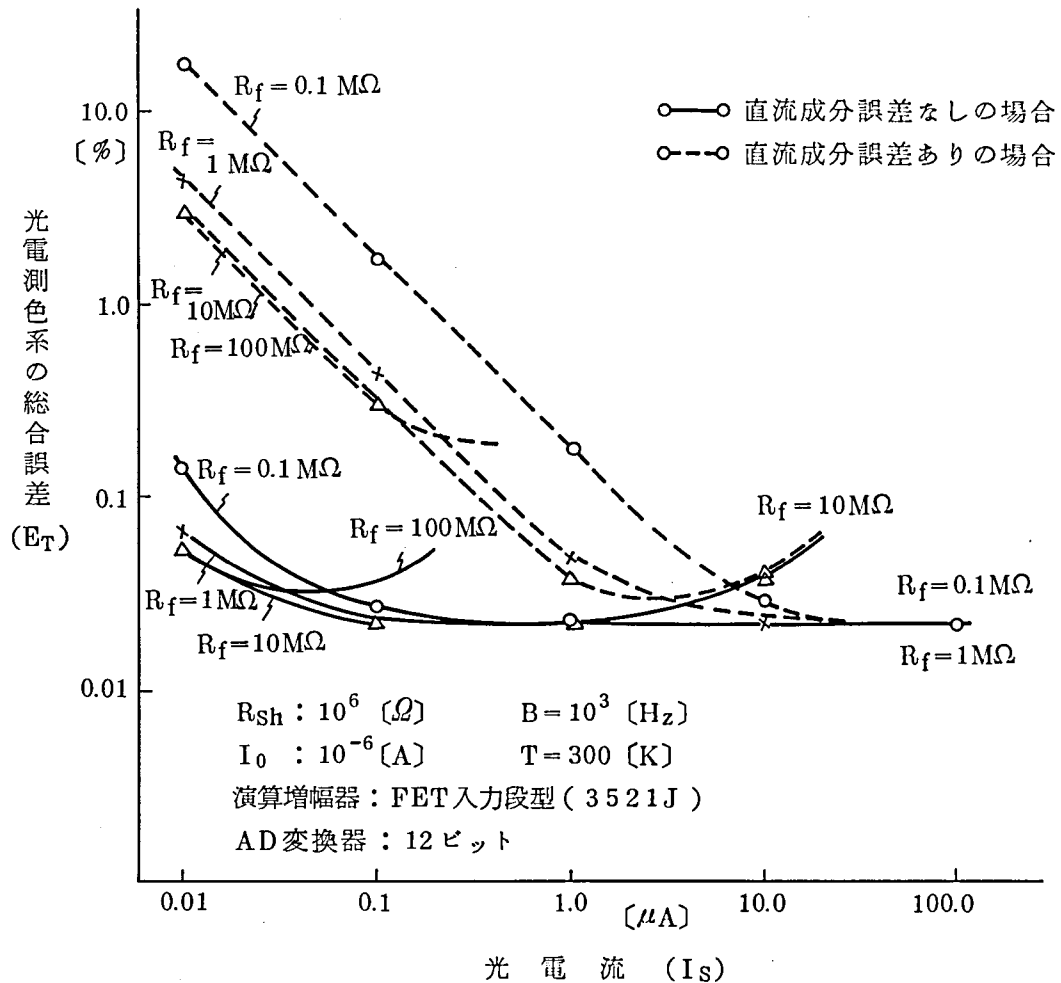


図 2 - 12 シリコン・フォトダイオードを使用したデジタル
光電測色系の総合誤差の例

E_{AC} : 交流成分雑音による誤差

E_{DC} : 直流成分雑音による誤差

E_{AD} : A/D変換系の誤差

典型的なシリコン・フォトダイオード ($R_{sh}=10^6 \Omega$, $I_0=10^{-6}A$) と本章付録に示した代表的な演算増幅器 (FET入力段型, 3521J), 代表的なA/D変換系 (有効12ビット) を組み合わせて、デジタル光電測色系を構成した場合の総合誤差を計算すると図2-12となる。

光電流 I_s を多く取れば相対的に誤差は小さくなるが、そのためには光電流に比例した照明光量が必要である。照明系の容量の制約、発熱の問題などから、照明光量を多くすることには限度がある。できるだけ少ない照明光のもと、すなわちできるだけ小さい光電流領域で必要十分な測定精度を確保することが重要となる。

図2-12において、光電流 (I_s) が $1.0\mu A$ 以下の範囲では直流成分雑音 (ここではドリフト) による誤差の影響が著しくなる。小さい光電流領域で誤差 0.1% 以下の測定を行うためには自動ゼロ補正など直流成分誤差を除去する対策が重要となる。直流成分雑音による誤差を有効に除去した状態では広い光電流範囲 (図2-12の例では $0.01\mu A \sim 10.0\mu A$) において誤差 0.1% 以下の測定が可能である。

光電測色系を構成する演算増幅器やA/D変換器など、個々の構成要素は、その誤差が小さいものほど価格的にも高価である。光電測色系の総合誤差は式 (2-14) で表わされる様に個々の誤差の自乗和の平方根であるから、価格対性能比の良い光電測色系を構成するためには、構成要素の個々の誤差のバランスを良くすることが重要である。

2.5 まとめ

シリコン・フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合は誤差要因について検討した。要点は、

1) フォトダイオードは製法、構造により数種類の型が有るが、PN接合層を浅くした型のものは短波長側の感度が高くまた可視波長域の分光感度温度特性も安定しており、測色用に適している。低容量プレーナ拡散型は無バイアスで高速応答が得られるから、分光感度特性と応答特性の両面から測色用に適している。

2) 直線性の良い受光器として使用するためには演算増幅器との組み合わせが不可欠であり、演算増幅器の性能が光電計測精度に大きく影響する。低い光電流領域で十分な測定精度を得るためにはFET入力段型の演算増幅器を使用する必要がある。

3) フォトダイオードと演算増幅器から成る光電変換系の主要な計測誤差要因は、a) 光電流出力の非直線誤差、b) 熱雑音などの交流成分雑音による誤差、c) ドリフトなどの直流成分雑音による誤差、である。それぞれの誤差を理論式で示すとともに、典型的な光電変換系の測光誤差をグラフ化して示した。

4) フォトダイオード、演算増幅器、AD変換器などで構成するデジタル光電測色系の総合誤差は個々の構成要素の誤差の自乗和の平方根となる。価格対精度比の良い光電測色系を得るためには全体の許容誤差に対し個々の構成要素の誤差をバランス良く配分することが重要となる。

本章の検討結果を通じて、フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合の誤差要因がわかり、個々の目的に応じて高性能の光電測色系を設計する際の最適設計方法を明らかにすることができた。

付表 2-1 代表的な演算増幅器の特性表

(Burr-Brown社演算増幅器)

種類 パラメータ	バイポーラ入力段型		FET入力段型	
	(BB)	3500B	(BB)	3521J
開ループゲイン： A_0	93 dB (MIN)		94 dB (MIN)	
入力オフセット電圧 V_{os} (at 25 °C)	± 2 mV (MAX)		$\pm 250\mu$ V (MAX)	
対温度特性 ΔV_{os} (T)	$\pm 5\mu$ V/°C		$\pm 5\mu$ V/°C	
入力バイアス電流 I_{os} (at 25 °C)	± 20 nA (MAX)		-20 pA (MAX)	
対温度特性 ΔI_{os} (T)	± 0.5 nA/°C		$-20 \times 2 \frac{\Delta T}{10}$ pA	
入力インピーダンス	$10^7 \Omega$		$10^{11} \Omega$	
入力換算ノイズ 電圧 (10Hz ~ 10kHz)	1.4μ V		2μ V	
電流 (10Hz ~ 10kHz)	35 pA		0.6 pA	
応答速度 ユニティ・ゲイン周波数	1.5MHz		1.5 MHz	
スルー・レート	0.8V/ μ sec		0.6V/ μ sec	

付表 2-3 代表的なA/D変換器における誤差

(Burr-Brown社データ収集システムSDH857kG)

誤差要因	分 解 能		
	8ビット	10ビット	12ビット
マルチプレクサ誤差 (E_{MPX})	0.0025 %	0.0025 %	0.0025 %
増幅器誤差 (E_{AMP})	0.01 %	0.01 %	0.01 %
サンプルホールド誤差 (E_{SHO})	0.01 %	0.01 %	0.01 %
A/D変換非直線誤差 (E_{ADA})	0.2 %	0.05 %	0.012 %
量子化誤差 (E_{ADQ})	0.2 %	0.05 %	0.012 %
総合誤差 (E_{AD})	0.283 %	0.072 %	0.022 %

付表2-2 代表的なシリコン・フォトダイオードの特性表
(浜松ホトニクス社、低容量プレーナ拡散型フォトダイオード)

型 名	受 光 面		特 性 (25℃)							NEP typ. (W/Hz ^{1/2})	D [*] typ. (cm Hz ^{1/2} /W)
			感度波長範囲	ピーク 波 長	放射感度 typ. (A/W)						
	サイズ (mm)	有効 受光面積 (mm ²)			typ. (nm)	ピーク 波 長	Hg 輝線 (254 nm)	He-Ne レーザ (633 nm)	GaAs LED (930 nm)		

S1336シリーズ (メタルケース型)

① S1336 58Q	2.5×2.4	5.6	190~1150	950±50	0.5	0.08	0.38	0.5	6×10 ⁻¹⁵	3×10 ¹³
② 58K			320~1150			—				
③ 88Q	5.9×5.9	33	190~1150			0.08				
④ 88K			320~1150			—			2×10 ⁻¹⁴	

S1337シリーズ (セラミックケース型)

⑤ S1337 16BQ	1.1× 5.9	5.8	190~1150	950±50	0.5	0.08	0.38	0.5	6×10 ⁻¹⁵	3×10 ¹³	
⑥ 16BR			320~1150			—					
⑦ 33BQ	2.5× 2.4	5.6	190~1150			0.08					
⑧ 33BR			320~1150			—					
⑨ 66BQ	5.9× 5.9	33	190~1150			0.08			2×10 ⁻¹⁴		
⑩ 66BR			320~1150			—					
⑪ 1010BQ	10.1×10.2	98	190~1150			0.08			3×10 ⁻¹⁴		
⑫ 1010BR			320~1150			—					

型 名	特 性 (25℃)								最 大 定 格		
	定格電流 (I sh)		暗電流 Id VR = 10mV max (pA)	暗電流の 温度係数 (倍/℃)	並列抵抗 (R sh) VR = 10mV		接合容量 VR = 0V Cj typ. (pF)	立上り時間 VR = 0V tr typ. (μs)	最大逆電圧 VR max (V)	保証温度範囲	
	100 lx min (μA)	2856 k typ. (μA)			min (GΩ)	typ. (GΩ)				動作 (℃)	保存 (℃)

①	4	5	25	1.15	0.4	2	65	0.2	5	-20~+60	-55~+80
②											-55~+100
③	22	28	150		0.06	0.3	370	1			-55~+80
④											

⑤	4	5	25	1.15	0.4	2	65	0.2	5	-10~+60	-20~+80
⑥	4.4	5.5									-20~+70
⑦	4	5									-20~+80
⑧	4.4	5.5	-20~+70								
⑨	20	25	150		0.06	0.3	370	1			-20~+80
⑩	22	28									-20~+70
⑪	65	80	500		0.02	0.1	1100	3			-20~+80
⑫	70	85									-20~+70

第三章 フォトダイオード一次元配列による 分光反射率の高速測定^{3-7), 3-8)}

3. 1 はじめに

色彩を扱う業務の自動化をはかるとき、測色装置と計算機を組み合わせるが、この場合測色装置は色彩情報を計算機に入力する一種の計算機入力装置と見ることができる。分光反射率値を計算機に入力するか、三刺激値を入力するかによって測色装置の形態が異なり、調色計算などの場合には分光反射率値を入力する必要がある。分光反射率測定のためには一般に分光光度計が使用されるが通常の分光光度計は必ずしも計算機との結合を意図したものではないし、また自動化装置など産業応用を第一目的に作られたものではないため、次の様な問題点がある。

- 1). 分光素子を機械的に駆動しているため測定速度を高めることには限度があり、計算機に分光反射率データを高速に入力することができない。
- 2). 高い測定精度を保つためには煩雑な構成（0%，100%合わせ）が必要であり、操作性などの面から必ずしも産業用途に適していない。

これらの問題点を改善し、計算機と組み合わせ自動化装置を構成する上で好適な高速高精度な分光光度計が望まれる。高速分光測定の一方法として、CCDイメージセンサーを使用し、スペクトル光を並列に受光し、瞬時に分光測定を行う方式も研究されているが、^{3-1), 3-2)} スイッチング回路を内蔵した自己走査型のイメージセンサーでは十分な測定精度を得ることは困難である。この方式では有効2桁程度の測定には使用できても、測定精度3桁を必要とする物体色の測定には不適當である。

フォトダイオードはすぐれた特性を持つ受光器であり、最近のIC技術によれば任意形状・多数素子の受光器も容易に作ることができる。第2章で示したように光電流を直接取り出す形のフォトダイオードを使用すれば3桁以上の精度を持つ測定も理論的には十分可能である。本章では各受光器の光電流を直接取りだせる構造の31素子のフォトダイオード一次元配列とマイクロ・プロセッサを使用し、スペクトル光を並列に受光するとともに精度向上のための信号処理をマイクロ・プロセッサで実行する高速分光光度計を試作評価する。本章の検討を通じ、可視波長域における10nm間隔の分光反射率を1秒の速度で測定する具体的方法を明らかにする。

3. 2 高速分光測定試作装置の構成

3. 2. 1 光学系

分光反射率の測定を主目的として試作した装置の光学系を、図3-1に示す。図において照明光源(LS)から出た光の一部は楕円面鏡(ESM)により集光され、円周45°方向から測定対象物(RS)を照明する。垂直方向の反射光はレンズ(L₂)、ミラー(M₂、M₃)、セクター(C)、およびレンズ(L₃)を経由してモノクロメータに導かれる。一方、照明光の一部は基準光としてレンズ(L₁)、ミラー(M₁)、光減衰用フィルタ(NF)、セクター(C)およびレンズ(L₃)を経由して、モノクロメータに導かれる。この試験装置において反射測定試料面の照度は、最高時で約85,000 lx、有効測定範囲は5mmφである。

モノクロメータ結像部には、31エレメントから成る受光器(シリコン・フォトダイオード、以下S_i・PDと記す)が配置され、可視波長範囲400~700nmの光を10nm間隔で受光する。セクターの構造は図3-1(b)であり、モータ(CDM)により60 r.p.mで回転している。したがって反射率測定に必要な三つのデータ、(1)試料からの反射光を受光したときの出力(S_i)、(2)基準光を受光したときの出力(K_i)、(3)両者を遮断した状態での出力(D_i)は図3-2のタイミングに従い1秒間内に検出される。セクターの回転に応じて生じる受光器の出力波形例を図3-2中にV_iとして示した。

i番目受光器で検出される第i番目波長点での反射率(R_i)は次の式で定まる。

$$R_i = \{ (S_i - D_i) / (K_i - D_i) \} \cdot C_i, \quad i = 1 \sim 31 \quad \dots (3-1)$$

ただし、C_i = (KW_i - DW_i) / (SW_i - DW_i) : 校正係数

KW_i, SW_i, DW_i : 測定試料(RS)の位置に標準白色面を配置したときの
それぞれの K_i, S_i, D_i 値

実際には式(3-1)で迷光補正項を付加する必要があるが、これについては後節で詳しく述べる。

反射試料設置位置(RS)に標準白色面を置き、透過試料設置位置(TS)に測定試料を置けば、同じ手順で透過率(T_i)が求まる。試作測定装置の外観を図3-3に示す。

3. 2. 2 モノクロメータおよび受光器の構成

モノクロメータは反射形回析格子を使用した一次リトロ形であり、その構造と受光器の関係を図3-4(a)に示す。分光素子として回析格子を使用しているため、可視波長域

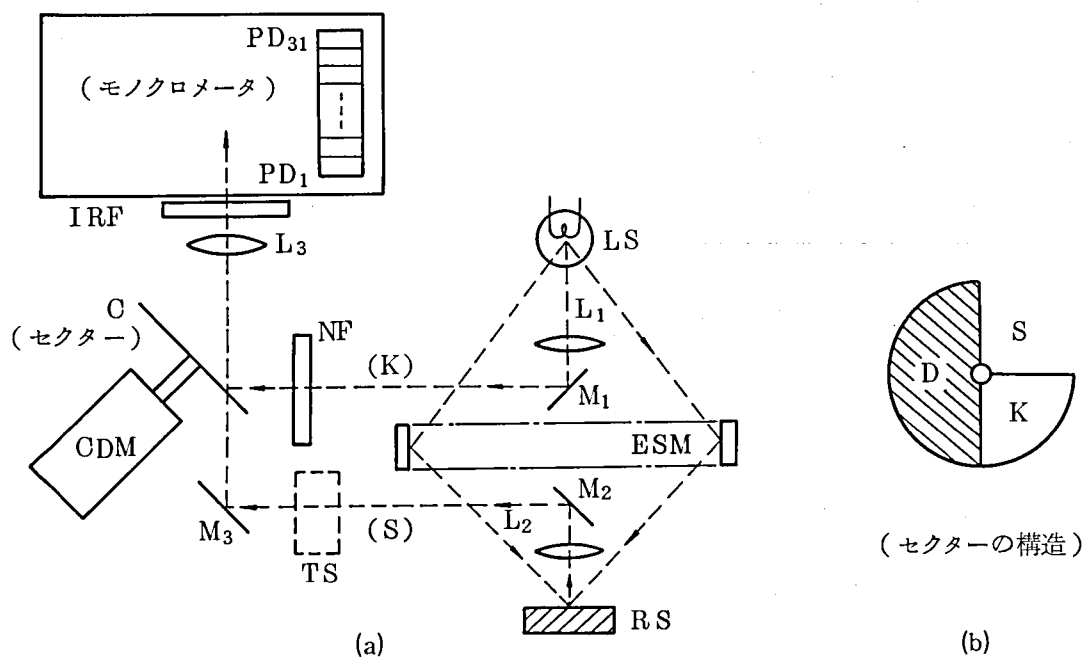


図 3 - 1 高速分光測定試作装置の光学系構成図

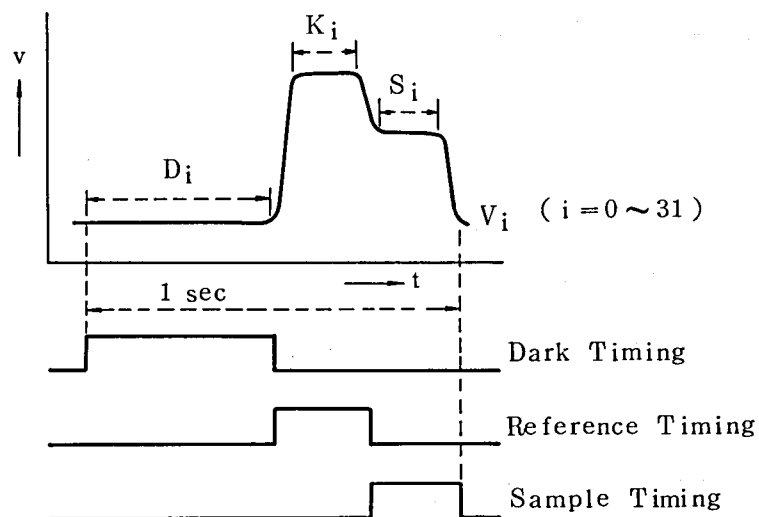


図 3 - 2 高速分光検出のタイミングと出力信号例

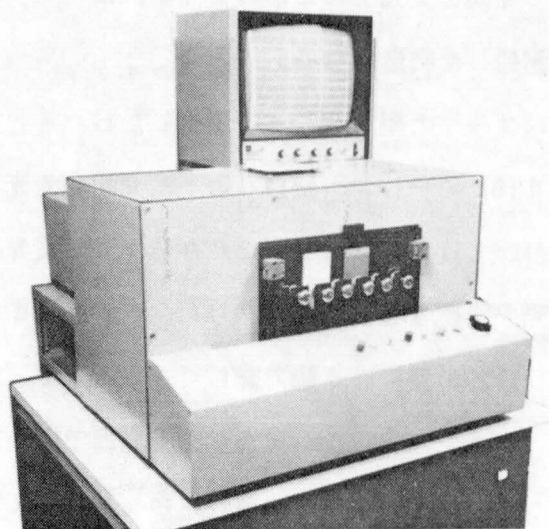


図 3 - 3 高速分光測定試作装置の外観

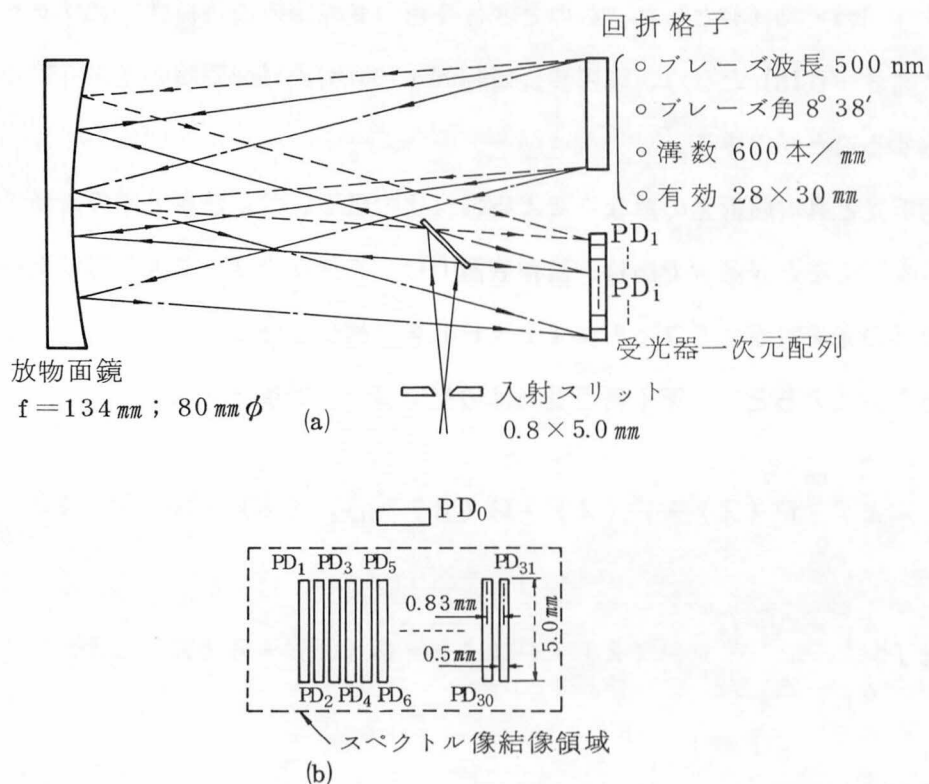


図 3 - 4 モノクロメータの構造(a)と受光器の構造(b)および両者の配置関係を示す図

(400~700nm)の範囲では、単位波長当たりの分散は十分に一定と見なせる。³⁻⁶⁾したがって可視波長域を10nm間隔で並列に受光するための受光器群は、同一面積の受光器を同一ピッチで31個一次元的に配列した構造となる。

図3-4(a)のモノクロメータと組み合わせて使用した $S_i \cdot PD$ 受光器群の構造を図3-4(b)に示す。図3-4(b)で $PD_1 \sim PD_{31}$ の一次元配列受光器はスペクトル像を並列に受光する受光器であり、1枚のシリコンウエハから作った受光器配列である。 PD_0 はモノクロメータ内の迷光を検出する受光器であり、スペクトル像結像領域外に配置された受光器である。受光器 PD_0 の機能は4節で詳しく述べるので、ここでは詳細をはぶく。受光器配列 $PD_1 \sim PD_{31}$ と受光器 PD_0 とは別個の受光器であるが、いずれもプレーナ拡散形の $S_i \cdot PD$ であって、分光感度などの特性は良く類似している。 $S_i \cdot PD$ 一次元配列受光器の外観を図3-5に示す。

31個の個々の受光器の有効波長幅は、受光器の幅(L_D)とモノクロメータ入射スリット幅(L_s)に依存し、その波長特性は図3-6で示される。³⁻⁴⁾個々の受光器で検出される信号のSN比と有効波長幅とは裏腹な関係にあり、試作装置ではできるだけ高いSN比を得、かつ十分な波長分解能(10nm以下)を確保するように、モノクロメータ入射スリットを0.8mm×5.0mmとした。このとき31個の受光器の波長特性(スリット関数 $B_i(\lambda)$)は図3-6(b)となり、可視波長域(400~700nm)の10nm間隔の光を有効波長幅9.4nmで検出することができる。

一次回折光と高次回折光の重なりによるSN比の低下、および赤外光の迷光によるSN比の低下を防ぐことが必要であり、試作装置では、モノクロメータ入口部に波長400~700nm以外の光を遮断するフィルタ(IRF)を付加している。

このような構成のもとで、第*i*番目受光器の光電流 I_i は次式となる。

$$I_i = \kappa \int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot B_i(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad \dots (3-2)$$

$$= \kappa \int_{\lambda_i - \Delta_i / 2}^{\lambda_i + \Delta_i / 2} P(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad \dots (3-3)$$

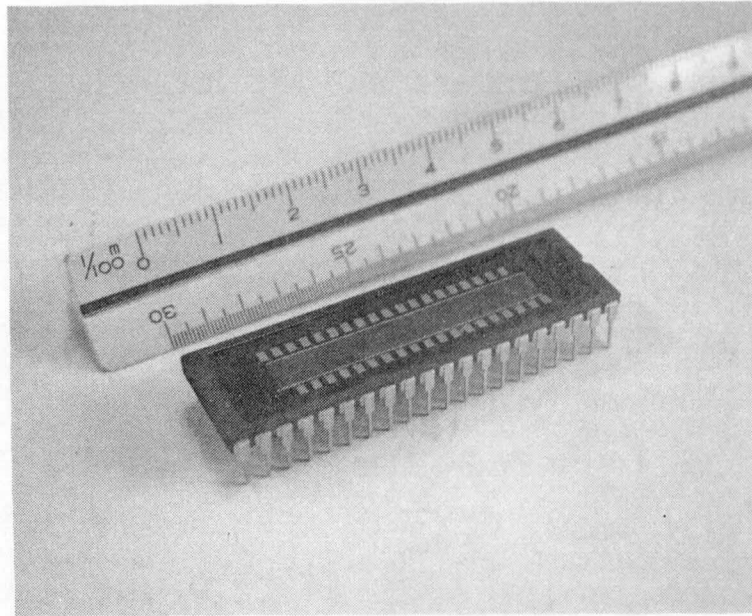


図 3 - 5 フォトダイオード一次元配列の外観

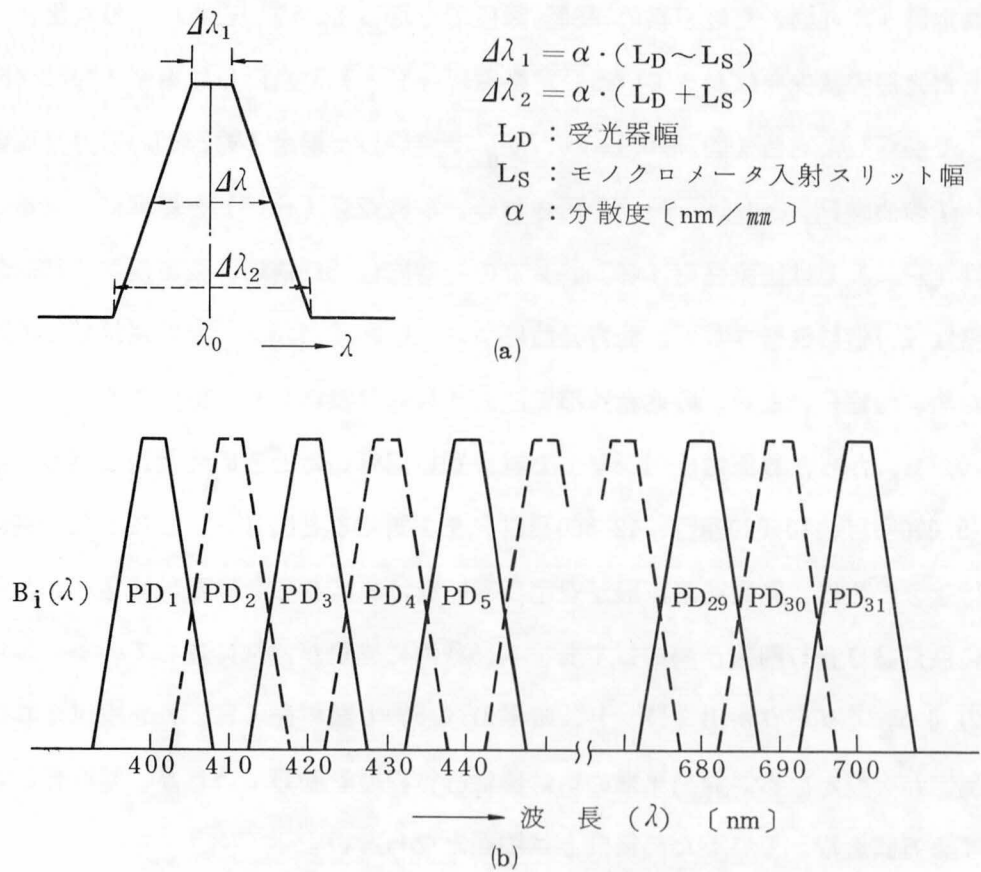


図 3 - 6 31 個の受光器の波長特性 (スリット関数)

ただし、 $P(\lambda)$: モノクロメータ入射光の分光放射強度

$F(\lambda)$: 赤外および紫外遮断フィルタの分光透過率

$G(\lambda)$: 回折格子の回折効率

$S(\lambda)$: 受光器の分光感度、 κ : 係数

$\lambda_i, \Delta\lambda$: i 番目受光器の受光中心波長および半値波長幅

試作装置における式(3-2)の関数値、およびそれらの積 $M(\lambda) = P \cdot F \cdot G \cdot S$ の相対値を図3-7に示す。 $M(\lambda)$ は受光器の総合的な分光感度相対値を表わしている。曲線 $M_1(\lambda)$ 、 $M_2(\lambda)$ はそれぞれ照明光源が2854K(P_1)、3300K(P_2)のときの分光感度相対値を表わす。曲線 $M_2(\lambda)$ からわかるように、受光器の総合的な感度は波長620nmの受光器(PD_{23})が最も高く、波長400nm受光器(PD_1)が最も低くなる。各受光器は標準白色面からの反射光を受光したときに最大の光電流を得るが、試作装置において PD_{23} の最大光電流は約250nA、 PD_1 の最大光電流は11nAとなった。

3. 2. 3 照明系

試作装置の照明光源(定格12V, 50W ハロゲン電球)は、非測定時に定格の70%電圧で点灯し、測定時(1秒間)だけ定格の130%電圧で点灯している。これにより検出信号のS/N比向上と発熱の減少をはかっている。定格電圧(V_0)で点灯した場合(約2854K)、

1.3 V_0 で点灯した場合(約3300K)、0.7 V_0 で点灯した場合(約2360K)の分光放射強度は図3-7の曲線 P_1 、 P_2 、 P_3 で示される。定格点灯(P_1)を基準に考えると1.3 V_0 点灯(P_2)では短波長側(400nm)での光電流は5.5倍に、長波長側(700nm)での光電流は2.7倍に改善される。他方発熱については電圧1.3 V_0 での点灯がごく短時間であるため、曲線 P_1 と P_3 の近赤外部に注目すれば発熱は1/3に減少する。

電圧0.7 V_0 から1秒間電圧1.3 V_0 で繰り返し点灯したときの光量過渡特性(点灯1回目、5,000回目、10,000回目、12,500回目)を実測すると図3-8となった。高精度の測定を行なうためには発光過渡波形が安定していなければならないが、図3-8からわかるように点灯繰り返し回数が増加しても、0.5秒内に光量が定常に達している。したがって前半の0.5秒でダーク検出(D_i)、後半の0.5秒で試料光(S_i)を検出すれば高い精度の測定が可能となる。発光光量の絶対値は5%程度変動しているが、基準光と試料光を比較する方式を取っているため精度上は問題とならない。

過電圧点灯を繰り返すと寿命に悪影響が出るが、繰り返し周期5秒(4秒間0.7 V_0 点

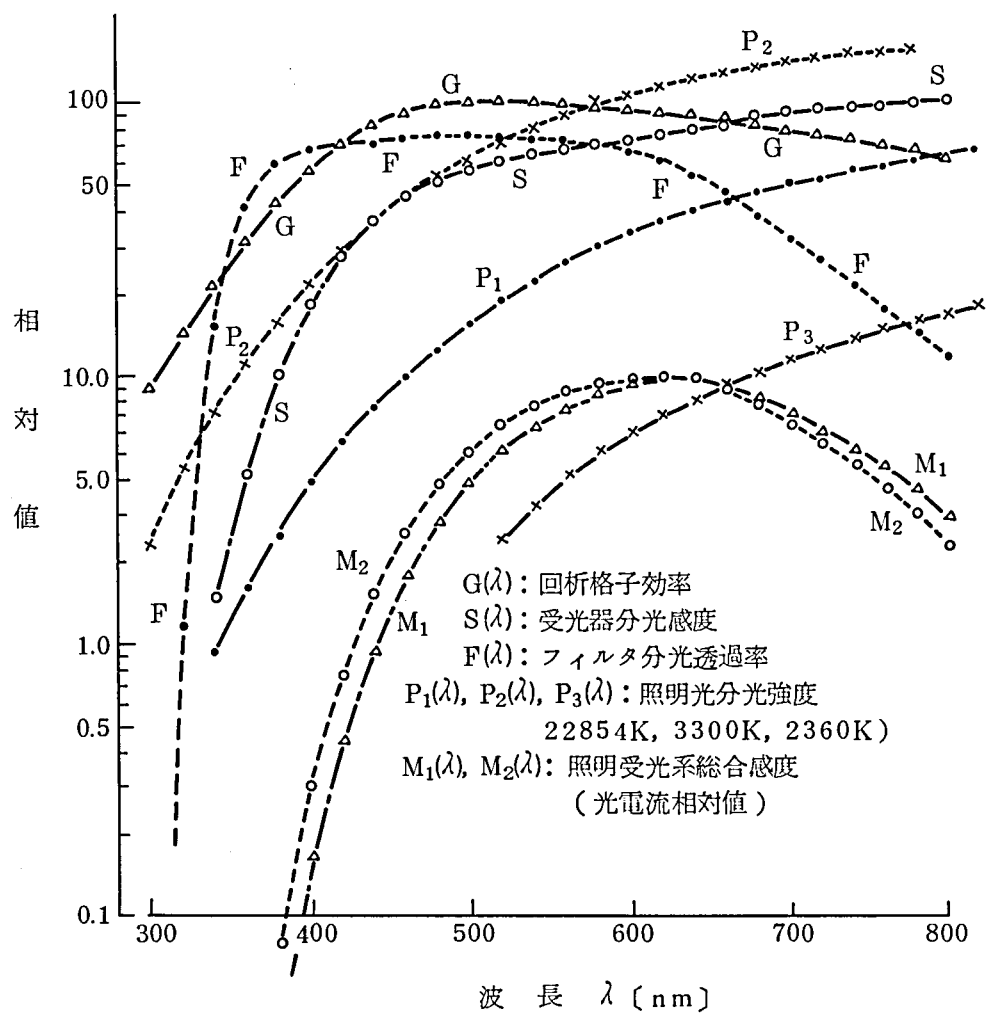


図 3 - 7 照明受光系の総合分光感度とそれを決定する各要素の分光特性

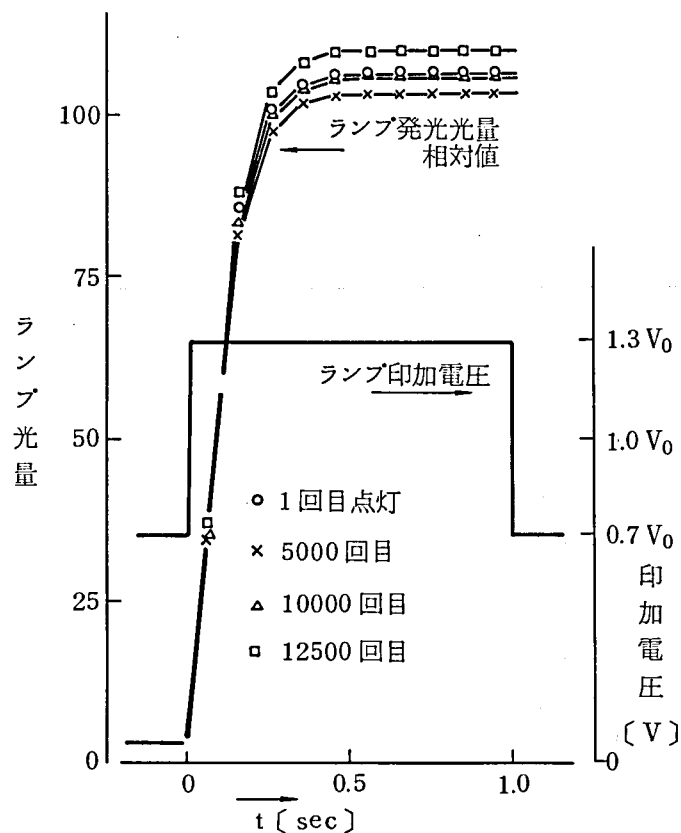


図 3 - 8 ステップ状電圧を加えたときの
ランブ光量

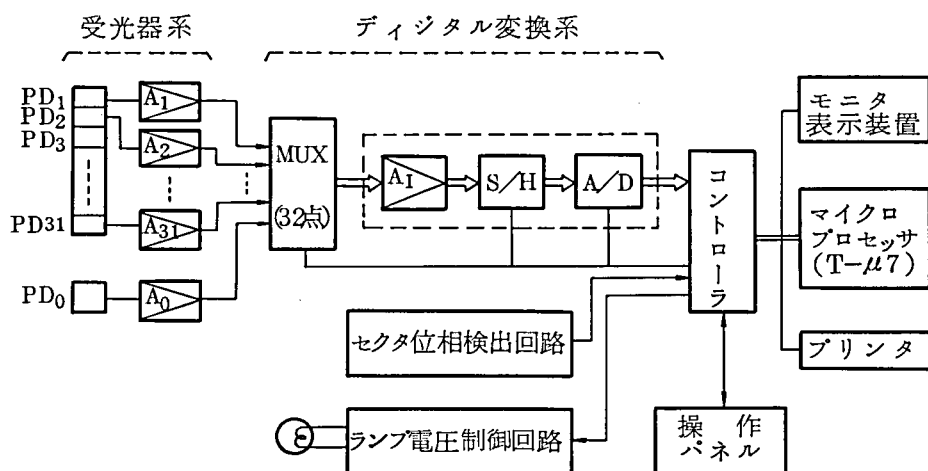


図 3 - 9 高速分光測定試作装置の電気系構成図

灯、1 秒間 $1.3V_0$ 点灯) で3個のサンプルの寿命試験を行なった結果、いずれも1万回以上の寿命が確認された。この程度の使用方法是実用上差し支えない。

3. 2. 4 電気系の構成

試作装置の電気系の構成を図3-9に示す。マイクロプロセッサ(TOSBAC micro7、メモリ-64Kバイト)は、測定値の算出に必要な計算や定数の記憶だけでなく、測定器の制御や表示装置の制御も行なう。

各受光器の総合感度は図3-7曲線 M_2 に示されるように、短波長側と長波長側とで30倍以上の差があるから、31個の $S_i \cdot PD$ に直接マルチプレクサを付加すると、雑音やA・D変換器のダイナミックレンジの点から十分なSN比が得られない。したがって試作した $S_i \cdot PD$ アレイは直接光電流を取り出す構造とし、各受光器ごとに演算増幅器を付加している。標準白色面からの反射光を受光したときの各チャンネルの出力がほぼ一定($1.0V$)になるように電流電圧変換した後、マルチプレクサおよびA-D変換器を介してマイクロプロセッサにデータを転送している。

ランプ電圧制御回路は通時 $0.7V_0$ の電圧をランプに加え、測定時の1秒間に $1.3V_0$ の電圧を加える制御回路であり、セクターの回転位相と同期して電圧制御を行なう。モニタ表示装置は、31点の測定データを分光反射率(または透過率)表にして示す表示装置である。測定器の操作は操作パネルを通じて行なう。操作パネル上には動作モード指定スイッチ(校正モードと測定モード)測定開始スイッチなどがあり、操作パネルの設定状態に基づいてマイクロプロセッサが一連の制御を行なう。

3. 3 検出精度の検討

受光器からデジタル信号を得るまでの検出信号の精度は、図3-9に示されるように、受光器系の精度とデジタル変換系の精度に分けて考えられる。

3. 3. 1 受光器系の直線性

$S_i \cdot PD$ と演算増幅器で構成される系の非直線誤差は2章式(2-4)で表わされる。受光面積が 2.5mm^2 程度の $S_i \cdot PD$ は室温付近で $I_0 < 10^{-6}\text{A}$ 、 $R_{sh} > 1\text{M}\Omega$ である。ここでは非直線性を評価する立場から最も状態が厳しい場合を考え $I_0 = 10^{-6}\text{A}$ 、 $R_{sh} = 1\text{M}\Omega$ とすれば、非直線誤差 $E_{LN}[\%]$ は図3-10となる。図3-7の光電流相対値(M_2)に示されるように、31個の各波長の受光器の感度は大幅に異なり、それぞれの負荷電流

・負荷抵抗値が異なるから非直線誤差も一律には論じられない。ここでは誤差の限界を知る目的から、感度の最も低い受光器（PD₁, 400nm）、感度の最も高い受光器（PD₂₃, 620nm）、および平均的な感度の受光器（PD₁₃, 500nm）を代表例として非直線誤差を見積もる。

各受光器とも、標準白色面からの反射光を受光したときに最大の負荷電流を発生するが、上記三つの代表的受光器に関し実効負荷および最大負荷電流 I_s^{\max} を表3-1に示す。最大負荷電流はPD₁ で約10nA、PD₂₃で約240nAである。他の受光器の最大負荷電流はこの値の間に入る。

代表的な3受光器の非直線誤差を図3-10の中に記入した。図示されるように短波長側の受光器PD₁ の非直線誤差が最も大きい。しかしこの場合でもその誤差は $3.68 \times 10^{-3}\%$ 以内である。

3.3.2 交流成分雑音

S_i ・PDと演算増幅器の組み合わせからなる系の交流成分雑音は2章2.3.2項に示した。雑音出力は式(2-7)、信号出力は式(2-8)で示される。したがって、交流成分雑音による測光誤差は式(2-9)で与えられる。

代表的な演算増幅器（試作装置ではバーブラウン3521L）では、式(2-9)の定数は $e_{in} = 3.0\mu V$, $i_{in} = 0.25 pA$ 、また3.3.1項でも述べたように、受光面積 $2.5mm^2$ 程度の S_i ・PDの状態の悪い場合として $R_d = 1M\Omega$ と置き、 $B = 1kHz$ （1秒以内の検出に必要な帯域値）、 $T = 300K$ （室温）の条件下では式(2-9)は次のように表わされる。

$$E_{AC} = 10^{-6} \cdot (2.59 \times 10^{-7} + 3.20 I_s + 0.17/R_f)^{1/2} / I_s \quad \dots (3-4)$$

ただし、 E_{AC} ：交流成分雑音による測光誤差 [%]

I_s ：出力電流 [A]

R_f ：演算増幅器の帰還抵抗 [Ω]

式(3-4)で帰還抵抗 R_f をパラメータとした場合の E_{AC} 値を図化して示すと図3-11となる。代表的な3受光器（PD₁, PD₂₃, PD₁₃）の E_{AC} 値を図3-11の中に示してある。交流成分雑音による測光誤差は、短波長側の受光器PD₁ で最も多きくなるが、この場合でも $E_{AC} < 5.19 \times 10^{-2}\%$ となる。

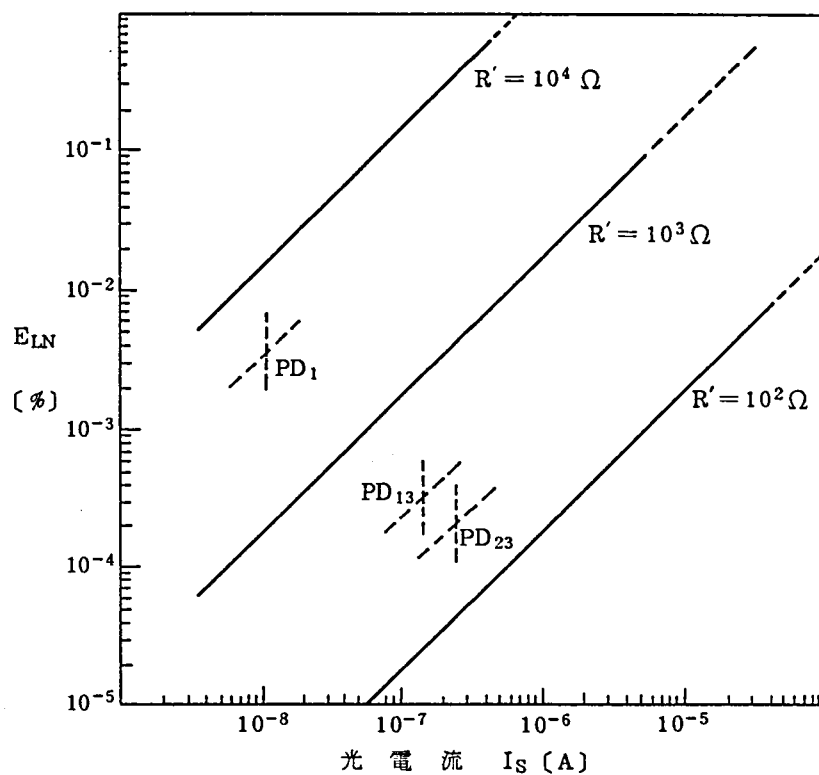


図 3 - 10 光電流と非直線誤差

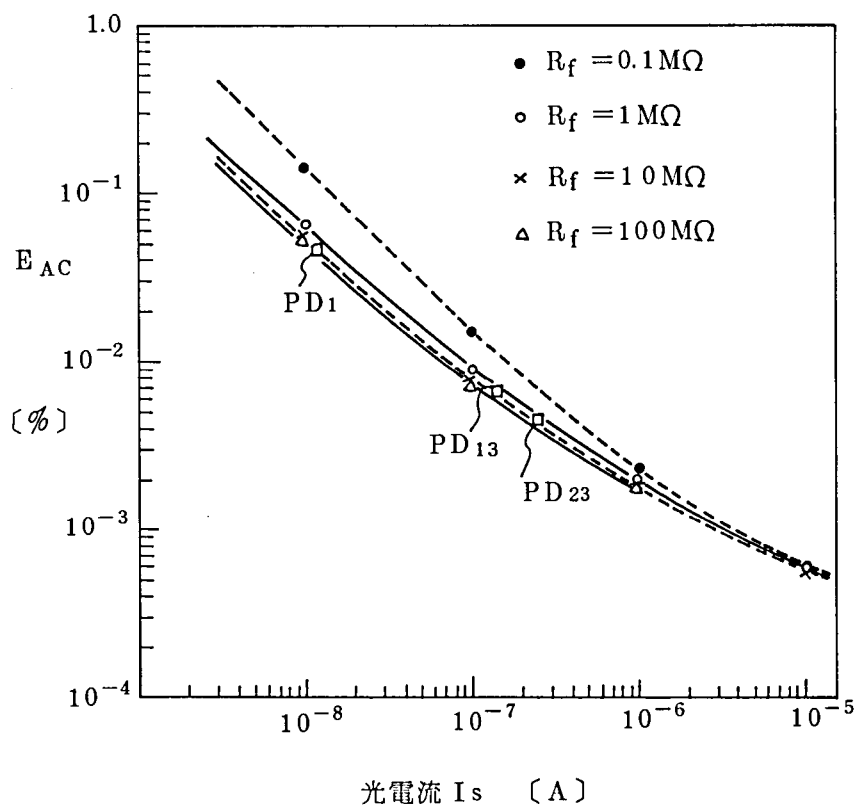


図 3 - 11 光電流と交流成分雑音による誤差

表3-1 代表的受光器の最大光電流と実効負荷

受光器	標準白に対する光電流 (I_s^{\max})	増幅器帰還抵抗 (R_f)	実効負荷 $R' = R_s + R_f / A_0$
PD ₁	10.5 nA	90.9M Ω	4,560 Ω
PD ₂₃	244.4 nA	4.1M Ω	215 Ω
PD ₁₃	156.4 nA	6.4M Ω	330 Ω

$$R_s \leq 10\Omega, A_0 = 86\text{db} = 2 \times 10^4 \text{ (増幅器開ループゲイン)}$$

表3-2 試作装置における代表的受光器の信号検出誤差

受光器	$E_{LN}(\%)$	$E_{AC}(\%)$	$E_{AD}(\%)$	$E_T(\%)$
PD ₁	3.68×10^{-3}	5.19×10^{-2}	2.22×10^{-2}	5.65×10^{-2}
PD ₂₃	2.07×10^{-4}	4.27×10^{-3}	2.22×10^{-2}	2.24×10^{-2}
PD ₁₃	3.11×10^{-4}	5.68×10^{-3}	2.22×10^{-2}	2.27×10^{-2}

3. 3. 3 直流成分雑音

受光器系の直流成分雑音は、 $S_i \cdot PD$ の暗電流の温度変動および演算増幅器バイアス電流やオフセット電圧の温度変動により生じる。試作装置で試算すると $\pm 20^\circ\text{C}$ の温度変動に対し、直流成分雑音に原因する誤差は最大 0.1%程度になる。有効3けたの測定を実現するためには無視できない雑音であるが、本試作装置のように測定実行ごとにダーク出力 D_i を検出し、他の出力 S_i 、 K_i ($i = 0 \sim 31$) から D_i を引きさる処理を行なう場合、直流成分雑音による精度低下は防がれる。したがって、高精度な測定のためにはダーク出力 D_i の検出と処理が不可欠といえる。

3. 3. 4 信号検出系の総合精度

$S_i \cdot PD$ で光電変換されA-D変換器でデジタル信号を得るまでの主要な誤差要因は、(1) デジタル変換系の誤差 (E_{AD})、(2) 受光器系の非直線誤差 (E_{LN})、(3) 受光器系の交流成分雑音による誤差 (E_{AC}) である。この三つの誤差要因を考えた場合、検出信号の総合的な誤差 (E_T) は次式で示される。

$$E_T = [(E_{AD})^2 + (E_{LN})^2 + (E_{AC})^2]^{1/2} \quad \dots (3-5)$$

前記の代表的な3受光器 (PD_1 、 PD_{23} 、 PD_{13}) について、それぞれ総合的な検出誤差を計算すると表3-2となった。この表から明らかなように長波長側の受光器の検出精度が最も悪いが、その場合でも総合誤差は 0.057%以下である。 $S_i \cdot PD$ アレイで分光検出を行なう場合、各波長ごとの検出信号の精度は十分に3桁確保される。

3. 4 データ処理による精度向上

3. 4. 1 受光器の中心波長誤差補正

31個の受光器の受光中心波長は、400nm から始まって10nm間隔であるが、実際には種々の誤差が蓄積して受光中心波長に多少のずれが生じる。試作装置の31個の受光器について、中心波長誤差を実測した結果が、図3-12である。いずれも中心波長誤差は $\pm 1.5\text{nm}$ 以内であったが、この程度の誤差であれば、マイクロプロセッサ側で波長誤差補正が可能である。

物体色測定では、得られる分光曲線の変化がかなりゆるやかであるから、分光反射率曲線を部分的に二次曲線で近似することで補正可能である。この場合、サンプリング波長点の隣り合う3点の値をもとに中心波長誤差補正式は次式となる。

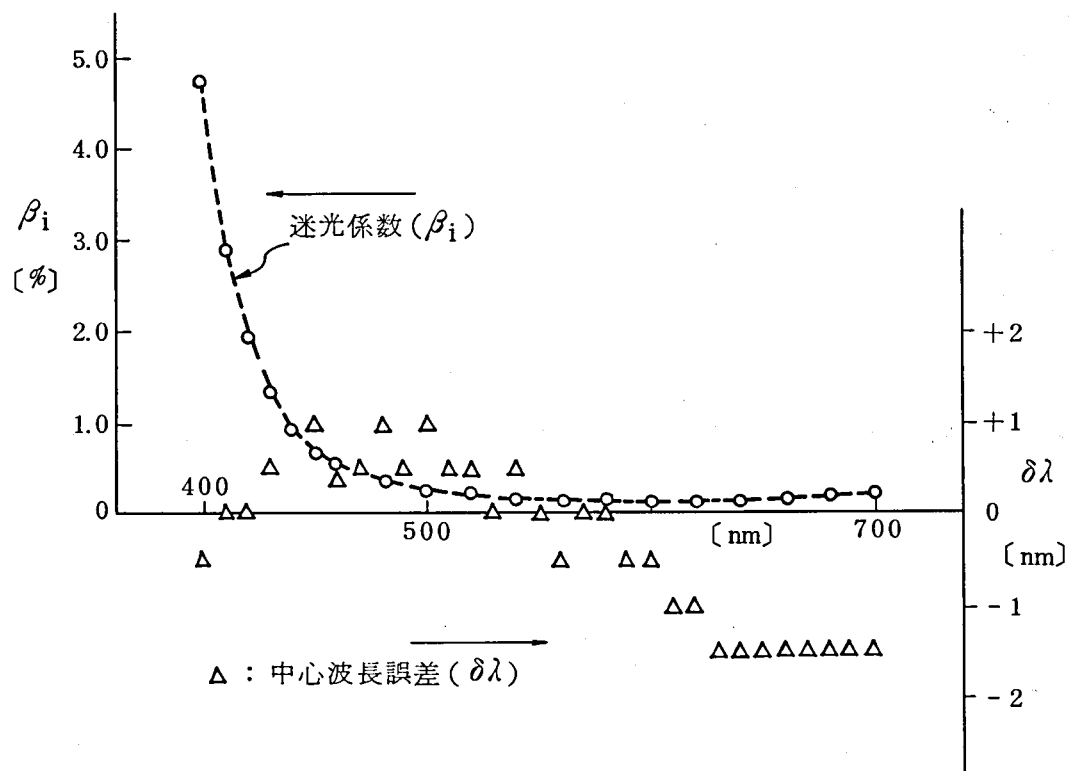


図 3 - 12 試作装置における各受光器の迷光係数 (β_i) および中心波長誤差 ($\delta\lambda$)

$$R_{\lambda i}^0 = R_{\lambda i} - f'(\lambda_i) \cdot \delta \lambda_i, \quad i = 2 \sim 30 \quad \dots (3-6)$$

$$f'(\lambda_i) = \left\{ \frac{(R_{\lambda i} - R_{\lambda i-1})(10 + \delta \lambda_{i+1} - \delta \lambda_i)}{10 + \delta \lambda_i - \delta \lambda_{i-1}} + \frac{(R_{\lambda i+1} - R_{\lambda i})(10 + \delta \lambda_i - \delta \lambda_{i-1})}{10 + \delta \lambda_{i+1} - \delta \lambda_i} \right\} / (20 + \delta \lambda_{i+1} - \delta \lambda_{i-1}) \quad \dots (3-7)$$

ただし、 $\delta \lambda_i$: i 番目受光器の中心波長誤差（単色光を入射させて測定）

$R_{\lambda i}$: i 番目の分光反射率（あるいは透過率）実測値

$R_{\lambda i}^0$: 波長誤差補正を加えた値

$i = 1, 31$ の両端の補正は、近傍実測値の直線近似により補正計算を行なう。上記の補正計算の効果は後節の実測例による検討の項で述べる。

3. 4. 2 迷光誤差補正

モノクロメータに入射した光の一部は、ミラーや回折格子面上で乱反射して迷光になる。また一次および二次以上の回折光もモノクロメータ内部で一部乱反射して迷光になる。迷光を光学的な手段だけで完全に除去することは不可能である。 i 番目受光器の受光出力を V_i とするとき、迷光出力（ V_{ni} ）と信号出力（ V_{si} ）との関係は

$$V_i = V_{si} + V_{ni} \quad \dots (3-8)$$

$$\text{ただし、} \quad V_{si} = \kappa \int_{\lambda_i - \Delta \lambda / 2}^{\lambda_i + \Delta \lambda / 2} P(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad \dots (3-9)$$

$$V_{ni} = \kappa' \int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \quad \dots (3-9)'$$

と表わされる。上式で P , F , G , S など記号の意味は式（3-2）、式（3-3）と同

じであり、 κ , κ' は係数である。

$S_i \cdot PD$ は短波長側の感度が小さく、他方迷光による光電流 V_{ni} は式(3-9)'のように全波長域にわたる積分値であるから、短波長側の受光器ほど迷光による精度低下を起こす。試作装置において基準光(K_i)を受光したときの迷光の率($100V_{ni}/(V_{si} + V_{ni})$)を測定すると、400nm 受光器(PD_1)では4.8%にも達する。有効3桁の高精度測定を行なうためには、迷光誤差対策が非常に重要となる。

迷光は正常な回折光と異なり指向性を失った光であるから、スペクトル像の結像領域付近では、単位面積に入射する迷光量は場所によらずほぼ一定と考えられる。図3-5(b)に示すように受光器配列を設置するスペクトル像結像領域外で、その近傍位置に迷光だけ受光する第0番目の受光器(PD_0)を配置すれば、この受光器の出力 V_{n0} と他の受光器の迷光出力 V_{ni} とは、 $V_{ni} = \beta_i \cdot V_{n0}$ の関係にある。31個の個々の受光器についてあらかじめ係数 β_i を求めておけば、マイクロプロセッサ側で迷光補正が可能である。

β_i を i のすべて($i = 1 \sim 31$)にわたって測定することは非常にむずかしいが、410nm以下の短波長側を遮断するシャープカット色フィルタを使用すれば、 β_1 は比較的容易に測定可能である。すなわちモノクロメータ入口部に上記フィルタを付加し、基準光を受光した場合の第1番目受光器(PD_1)の出力と第0番目受光器(PD_0)の出力の比として β_1 が定まる。31個の受光器(PD_i , $i = 1 \sim 31$)のそれぞれの迷光係数は、総合感度 $M_2(\lambda)$ に逆比例すると考えられるから、 β_1 が決まれば $i = 2 \sim 31$ の β_i は次式で推定される。

$$\beta_i = \beta_1 \cdot \{M_2(\lambda_1)/M_2(\lambda_i)\} \cdot (K_i/K_1), \quad i = 2 \sim 31 \quad \dots (3-10)$$

ただし、 $M_2(\lambda_i)$ ：図3-7曲線 M_2 で示される受光器の相対感度

K_i ：基準光を受光したときの i 番目受光器の出力

試作装置において求まった迷光係数を図3-12の中に示した。

このような迷光補正係数を考えた場合、分光反射率 R_i を求める基本式、式(3-1)は次のように変形される。

$$R_i = \frac{(S_i - D_i) - \beta_i \cdot \gamma_i (S_0 - D_0)}{(K_i - D_i) - \beta_i \cdot \gamma_i (K_0 - D_0)} \times C_i \quad \dots (3-11)$$

$$C_i = \frac{(KW_i - DW_i) - \beta_i \cdot \tau_{wi} (KW_0 - DW_0)}{(SW_i - DW_i) - \beta_i \cdot \tau_{wi} (SW_0 - DW_0)}, \quad i = 1 \sim 31$$

... (3-12)

$$\tau_i = (K_i / K_0) \cdot P_i, \quad \tau_{wi} = (KW_i / KW_0) \cdot P_i$$

... (3-13)

ただし、 $S_i, K_i, D_i, SW_i, KW_i, DW_i$ は式 (3-1) と同じ

S_0, K_0, D_0 : 試料測定の際の S_i, K_i, D_i 検出タイミングにおける迷光検出受光器 (PD_0) の出力

SW_0, KW_0, DW_0 : 校正係数 C_i 決定の際の S_i, K_i, D_i 検出タイミングにおける迷光検出受光器の出力

$P_i = K_{b0} / K_{bi}$: 迷光係数決定の際の K_0 / K_i 値

式 (3-11), (3-12) で感度変動係数 τ_i, τ_{wi} を考慮しているから、受光器 PD_0 と受光器 PD_i との間で時定数の長い感度変動が起こっても、最終結果 R_i に誤差が現われない。この迷光補正方式の効果の評価は次の 3. 5 節で行う。

3. 4. 3 検出値の加算平均

セクターは図 3-1 に示すように 1 回/秒で回転し、基本的な検出量 S_i, K_i, D_i ($i = 0 \sim 31$) の信号提示時間は図 3-2 に示すように、それぞれ約 0.2 秒、0.2 秒、0.5 秒である。一方、ディジタル変換系のデータ変換速度、およびマイクロプロセッサへのデータ転送速度は、十分高速 (試作装置では 27kHz および 38K バイト/秒) であるから、上記の信号提示時間内での繰り返しデータ検出と加算平均が可能である。

n 回の繰り返しデータ検出により基本検出量は次式となる。

$$S_i = \sum_{I=1}^n S_i(I), \quad K_i = \sum_{I=1}^n K_i(I), \quad D_i = \sum_{I=1}^n D_i(I)$$

$i = 0 \sim 31$... (3-14)

この場合、検出データの S/N は $n^{1/2}$ 倍改善される。

試作装置では 8 回の加算平均を行なった。校正係数 C_i のように、測定器全体の精度を

左右する係数の決定では、標準白色面の測定を自動的にN回（試作装置では4回）繰り返し二重に加算平均を行なうことも効果的である。

3.5 実測結果による評価検討

適当な測定サンプル3種類を対象とし、試作装置で測定した値と既存分光光度計（Carry-14型、半値波長幅 1.0～ 3.0nm）で測定した値とを比較して示すと図3-13となる。図で連続曲線は既存分光光度計による実測値、・印は試作装置による測定値を示す。

測定結果の相互比較に際し、照明受光条件など装置構造上の差による影響をできる限り除去するために、平行透過測定サンプル（色フィルタ(a)(b)(c)）を使用した。平行透過測定では測定器相互の偏差が最も小さくなるが、この場合でも± 0.25 %程度の偏差は起こり得る（JISでは、平行透過測定で 0.5%の測定器間隔差を許容している）。このことを考慮に入れて図3-13を見ると全般的に良好な結果が得られている。

曲線(a)の波長 400～500nm 範囲の（⊗）印は、迷光補正を行なわない場合の結果であるが、曲線(a)のような短波長側の透過率が低く長波長側の透過率が高い測定対象は、迷光誤差の影響を受けやすい。これに対し、・印の値は前章に述べた迷光補正を実施した場合の測定結果であり、既存分光光度計の測定結果と比較して満足できる結果となっている。この例からも明らかなように、受光器一次元配列で並列に受光する場合は、迷光誤差対策が非常に重要であり、本章に述べた迷光補正方式で実用上十分な効果が得られている。

既存分光光度計と試作装置では受光半値幅がかなり異なり、また受光中心波長誤差を二次曲線近似で補正しているなどのため、透過率が急激に変化して、 $dT/d\lambda$ が大きい部分では測定器間の偏差が大きく現われている。しかし一般的に反射試料の分光反射率曲線は平行透過試料の場合よりもかなり変化がゆるやかであり、図3-13に取り上げたサンプルは最も厳しい場合で、誤差の限界を示している。

2種類の測定器で、3種の評価サンプルを測定して求まる三刺激値、および測定器相互の偏差を色差値で表わした結果を表3-3に示す。測定器間偏差はいずれも色差 1.0

（CIE 単位）以内に納まっている。一般に物体色測定では、同一測定器においても測定再現性の問題が起こり、明るい色で 0.2CIE 単位、中明度以下の明るさの色で 0.5～ 1.0 CIE 単位程度の色差に相当する誤差が生じる。さらに機器相互の偏差を考えると、明るい色で 0.5CIE 単位、中明度以下の明るさの色で、1.0～ 2.0CIE 単位程度の差は十分に起

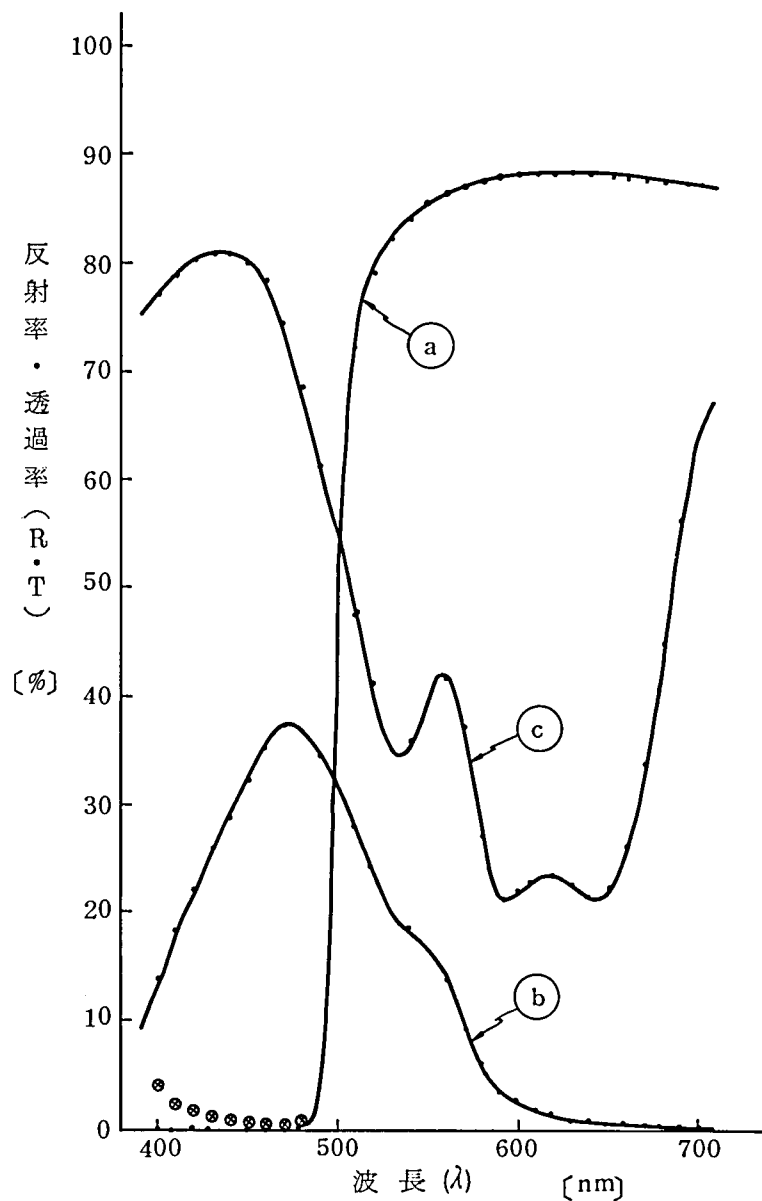


図 3 - 13 既存分光光度計による測定結果と高速分光測定試作装置による測定結果の比較図

表 3-3 2種類の測定器による測色結果および測定値相互の色差

測定値及び色差 サンプル		三 刺 激 値			色 差 (U^* V^* W^* 系の色差)
		X	Y	Z	
サンプル (a)	既存分光光度計	66.69	79.82	3.53	0.504 (CIE単位)
	高速測定器	66.31	79.36	3.74	
サンプル (b)	既存分光光度計	11.07	14.26	36.08	0.923
	高速測定器	10.96	13.99	36.03	
サンプル (c)	既存分光光度計	37.41	36.26	88.91	0.443
	高速測定器	37.33	36.25	89.16	

こり得る³⁻⁵⁾。この事実を前提に表3-3の結果を見ると、Si・PD一次元配列を使用した高速分光測定方式は、物体色情報の計算機入力装置として産業応用を考えると、実用上十分な性能を持つといえる。

3.6 まとめ

シリコン・フォトダイオード(Si・PD)一次元配列と、マイクプロセッサを組み合わせ、物体色を高速高精度に測定することの可能性を検討した。波長400~700nmの範囲において10nm間隔の分光データを1秒間で測定する仕様のもとで、

- 1) 受光器の非直線誤差、雑音による誤差、ディジタル変換系の誤差を考慮するとき、全可視波長範囲において理論的に有効3桁の分光検出が可能である。
 - 2) 既存の高精度分光光度計と比較して、測定色差1.0CIE単位程度の測色精度が得られる。
 - 3) 受光器一次元配列で並列受光する場合、迷光誤差に対する対策が重要である。具体的には迷光検出専用の受光器を配置しデータ処理による補正で高い効果が得られる。
- などの検討結果を得た。

精密な理科学測定器としては精度上問題が残るが、産業応用を中心とした高速分光測定装置として使用するとき、Si・PD一次元配列とマイクプロセッサを組み合わせた高速分光測定方式は、実用上十分な精度および速度を持つ。

分光測定器と計算機を組み合わせる用途は色々あるが、調色計算や着色の自動制御などを具体的な用途として想定し、本章では分光測定の世界目標値を1秒に設定した。照明系を瞬時過電圧点灯にしなければここに述べた方式で測定速度をさらに数倍高める可能性も残されている。

第四章 フォトダイオードによる色分解受光モジュール^{4-6), 4-7), 4-8)}

4.1 はじめに

目視検査の自動化などの場合は必ずしも分光反射率値測定を必要とせず、むしろ測定速度を格段に早くすることができ、かつ測色装置が簡便な三刺激値測定が適している。特にフォトダイオードの様に軽量小型で特性の安定した受光器による三刺激値測定は、自動化システムの色彩情報入力装置として適している。この時、①ルータ条件合わせなど人間の色覚特性に良く一致した色分解受光器を得ること。②誤差の小さい精度の高い測色信号を得ること。が重要となる。検査対象物の三刺激値を測定する方法として、結像レンズとダイクロイックミラーを使用し、色分解受光器で並列受光する方法が一般的であるが、レンズを使用するため信号光の受光効率が悪く、光電信号の S/N を十分高く取ることがむずかしい。特にフォトダイオードを使用する場合短波長側受光器の S/N を十分に取ることが困難である。あえて十分な S/N の光電信号を得ようとする、a)分光感度の制約をゆるめて全体的に受光器の感度を高める。b)照明光量を多くする。などが必要になるが、a)の場合には測色精度の低下が、b)の場合には光電計測系の発熱が問題となる。

色に関する検査判別は、①微小な部分の色を問題とする場合、②広い部分の平均的な色を問題とする場合、とに分けられるが、後者の場合は特に色に対する高い精度、すなわち微妙な色差が問題となる事が多く、高い精度の物体色測定が必要となる。本章ではフォトダイオードを使用し、検査対象物の比較的広い部分の平均的な色を高精度に測定する色分解受光モジュールを提案する。これは、

1. フォトダイオードと色フィルターの組合わせで人間の色覚特性に良く一致した色分解受光器を構成する。
2. 色分解受光器とミラーボックスの組合わせで対象物からの信号光を効率良く受光し、高い S/N の光電信号を得る。

ことを特徴とする測色モジュールである。以下本章においては色分解受光モジュールの構成方法および色分解受光器の設計方法を示し、後章で述べる色彩印刷物判別装置など色にかかわる検査自動化装置に有効な三刺激値測定方法を明らかにする。

4. 2 色分解受光モジュールの構造と特性

4. 2. 1 モジュールの構造と信号光の伝達率

色分解受光モジュール（以下MDモジュールと呼ぶ）は測定対象物の特定領域の平均的な反射率や透過率をマルチバンド（複数波長域）で測定することを目的とする。その基本的構造は図4-1（A）に示すように1:kの矩形で長さ l の内面反射鏡のボックスであり、光入射面（I）は透明拡散板（DB）、他の面（O）にはそれぞれ分光感度の異なる色分解受光器（ $D_1 \cdots D_n$ ）を配置したモジュールである。分光感度のそれぞれ異なる受光器は図4-1（B）に示すように具体的にはフォトダイオードと色ガラスフィルタの組合せで作る。入射面（I）に入る測定光はミラーボックスにより効率良く受光器面（O）に伝達され、しかも入射面の透明拡散板（DB）とミラーボックス内の多重反射により十分に拡散均一化されて複数の色分解受光器（ $D_1 \cdots D_n$ ）に受光されるから、精度の良い色分解受光が可能である。

MDモジュールの光入射面の光束発散度を M_I 、受光器面の照度を E_0 とすれば、信号光の伝達率は E_0 / M_I であるが、鏡面による多重反射を考えると伝達率（ η ）は次の式で表わされる。

$$\eta = E_0 / M_I = 4 \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} (C_{ij} \cdot \rho^{i+j}) \quad \cdots (4-1)$$

この式で ρ はミラーの反射率であり、 C_{ij} は以下の式で得られる。⁴⁻¹⁾

$$C_{ij} = (F_{1ij} - F_{2ij} - F_{3ij} + F_{4ij}) \times 100 \quad [\%] \quad \cdots (4-2)$$

$$F_{1ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{j+0.5}{\sqrt{l^2 + (j+0.5)^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{(i+0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (j+0.5)^2}} \right. \\ \left. + \frac{(i+0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (i+0.5)^2 \cdot k^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{j+0.5}{\sqrt{l^2 + (i+0.5)^2 \cdot k^2}} \right\} \quad \cdots (4-3)$$

$$F_{2ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{j+0.5}{\sqrt{l^2 + (j+0.5)^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{(i-0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (j+0.5)^2}} \right. \\ \left. + \frac{(i-0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (i-0.5)^2 \cdot k^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{j+0.5}{\sqrt{l^2 + (i-0.5)^2 \cdot k^2}} \right\} \\ \dots (4-4)$$

$$F_{3ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{j-0.5}{\sqrt{l^2 + (j-0.5)^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{(i+0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (j-0.5)^2}} \right. \\ \left. + \frac{(i+0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (i+0.5)^2 \cdot k^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{j-0.5}{\sqrt{l^2 + (i+0.5)^2 \cdot k^2}} \right\} \\ \dots (4-5)$$

$$F_{4ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{j-0.5}{\sqrt{l^2 + (j-0.5)^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{(i-0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (j-0.5)^2}} \right. \\ \left. + \frac{(i-0.5) \cdot k}{\sqrt{l^2 + (i-0.5)^2 \cdot k^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{j-0.5}{\sqrt{l^2 + (i-0.5)^2 \cdot k^2}} \right\} \\ \dots (4-6)$$

K, l については図4-1 参照

A) 辺比とミラー反射率に関する検討

式(4-1)を用いて計算した辺比(k)に対する伝達率を図4-2に示す。kが大きい程伝達率が高いが、k>5ではほとんど向上が見られない。伝達率を高める上ではk=3~5が望ましい。またミラー反射率(ρ)に対する伝達率を図4-3に示す。ρの低下により伝達率が著しく低下するから、極力ρの大きいミラーを使用する必要がある。アルミ表面ミラーの場合ρ=0.87であり、実用的にはこの程度の値で使用する事になる。

B) ミラーボックスの長さに関する検討

ミラーボックス(ρ=0.87の場合)の長さlに対する伝達率を図4-4に示す。当然

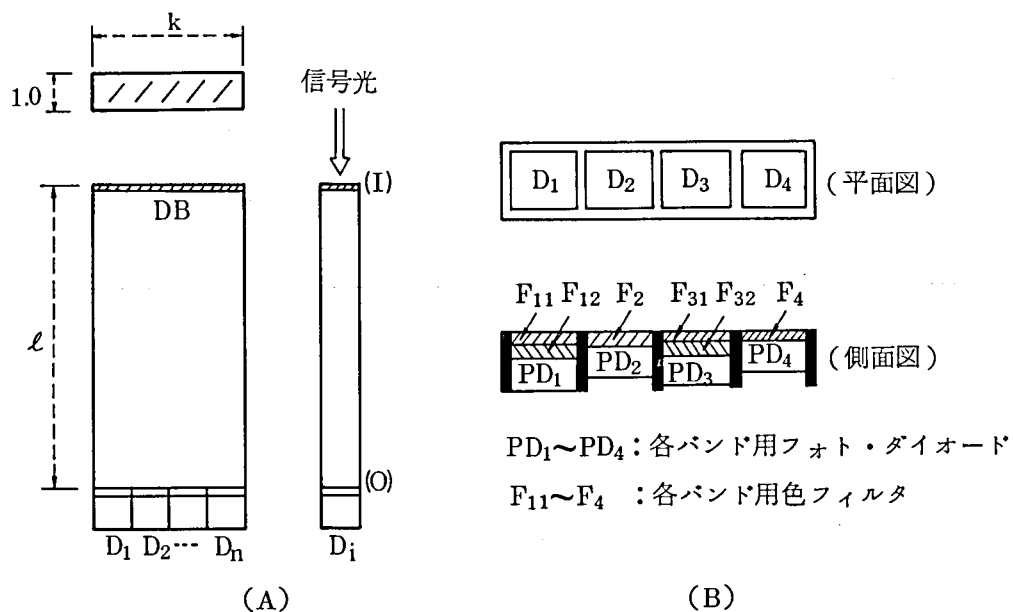


図 4 - 1 色分解受光モジュール(A)と色分解受光器(B)の構造を示す図

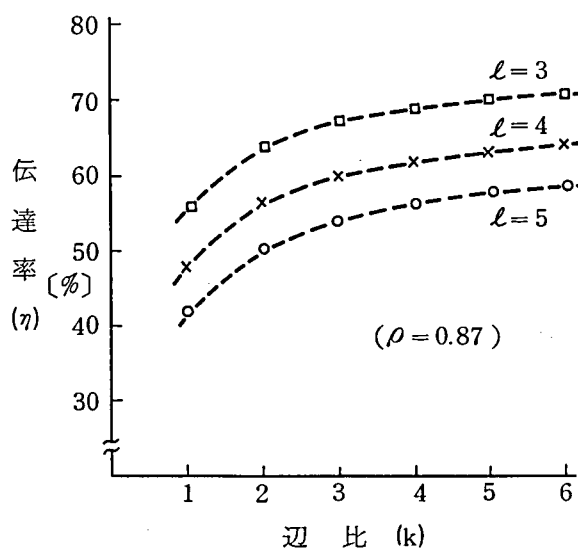


図 4 - 2 辺比(k)と伝達率の関係

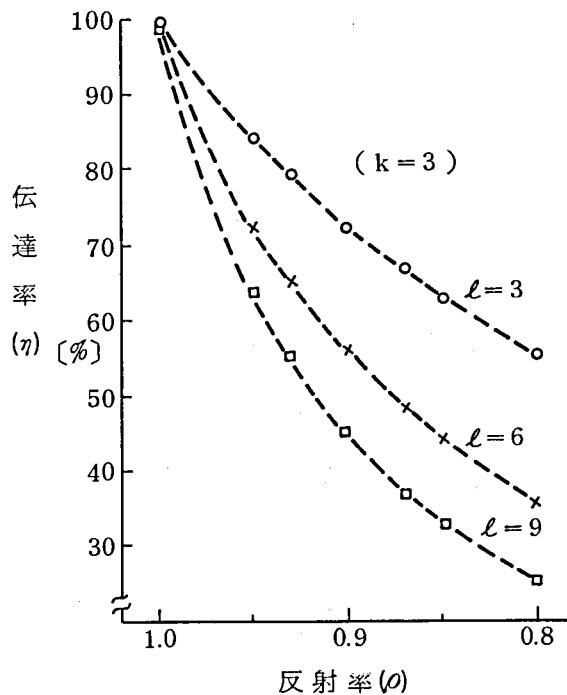


図 4 - 3 ミラーボックス内面反射率(ρ)と伝達率の関係

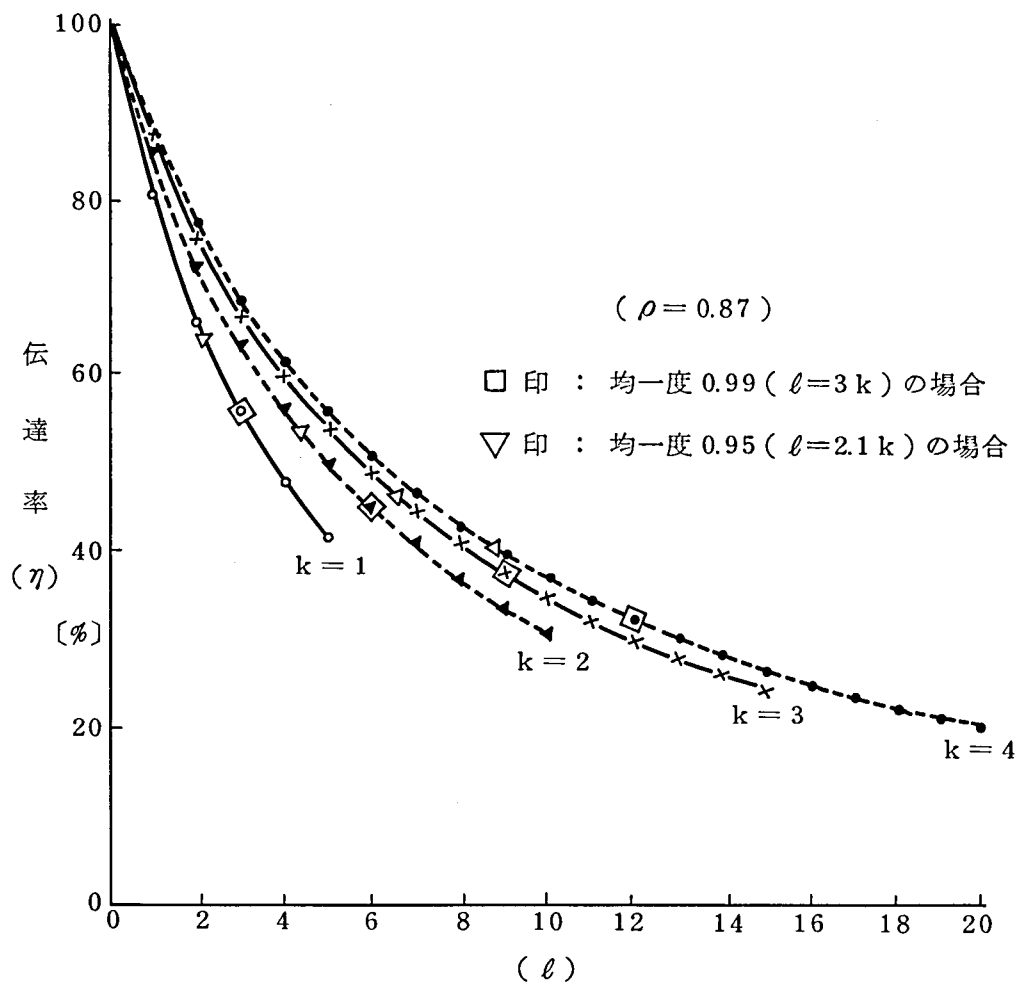


図 4 - 4 ミラーボックス長さ (ℓ) と伝達率の関係

の事ながら λ が大きいほど伝達率が下がるから、4. 2. 2項にのべる均一度（複数の受光器に入射する光が均一になる度合）とのかねあいで λ を決定する。均一度が 0.99, 0.95 の場合の伝達率を図4-4の中に示した。均一度を 0.99 にする時30%以上の伝達率、0.95 とする時40%以上の伝達率が得られる。

4. 2. 2 受光面の照度均一性

受光モジュールの入射面を通過する信号光は、入射面のどの部分から入る情報であっても色分解受光器に均等に入射しなければならない。そのためには、入射面のどの部分から出た光であっても受光面全体にわたって照度が均一になるように受光モジュールの 縦 (L_x), 横 (L_y), 長さ (L_z) を選ぶ必要がある。図4-5のように光入射面のある点Pを含む微小面 $d\sigma_p$ から出た光が受光面上の点Qにおける照度 E_Q は、面 $d\sigma_p$ からの直射光による照度と、受光モジュール側面の鏡によって反射を受けた光による照度との和である。すなわち鏡により n 回反射を受けた光による照度を E_n とすると、

$$E_Q = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \quad \cdots (4-7)$$

図4-6からわかる様に、受光モジュールの側面の鏡 $M_1 \sim M_4$ による点Pの鏡像を表わす点を $P'_{n,i,j}$ とすると、照度 E_Q はそれらの点から直接点Qに向う光による照度 E_{ij} の総和と考えることができる。便宜上次のように決める。鏡 M_4 に対して点P側に生ずる鏡像については $i = 1, 2, 3, \dots$ 、点Pと反対側に生ずる鏡像については $i = -1, -2, -3, \dots$ とする。また鏡 M_1 に対して点P側に生ずる鏡像については $j = 1, 2, 3, \dots$ とし、点Pと反対側に生じる鏡像については $j = -1, -2, -3, \dots$ とする。 n 回反射する光による照度 E_n を与える鏡像 $P'_{n,i,j}$ について (i, j) の組は、第一群 $(1, -n)$, $(2, -(n-1))$, \dots , $(n, -1)$ 、第二群 $(1, n+1)$, $(2, n)$, \dots , $(n+1, 1)$ 、第三群 $(-1, n)$, $(-2, n-1)$, \dots , $(-n, 1)$ および第四群 $(-1, -(n-1))$, $(-2, -(n-2))$, \dots , $(-(n-1), -1)$ 、全部で $4n$ 個あり、次式で表わされる。

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_{i, -n-1+i} + \sum_{i=1}^{n+1} E_{i, n+2-i} + \sum_{i=-n}^{-1} E_{i, n+1+i} + \sum_{i=-n+1}^{-1} E_{i, -n-i} \quad \cdots (4-8)$$

受光面の一端Oを原点とする座標軸 X, Y, Z を考える。点Pの座標を (X_p, Y_p, Z_p) 、その鏡像 $P'_{n,i,j}$ の座標を $(X'_{ij}, Y'_{ij}, Z'_{ij})$ 、また点Pを含む入射

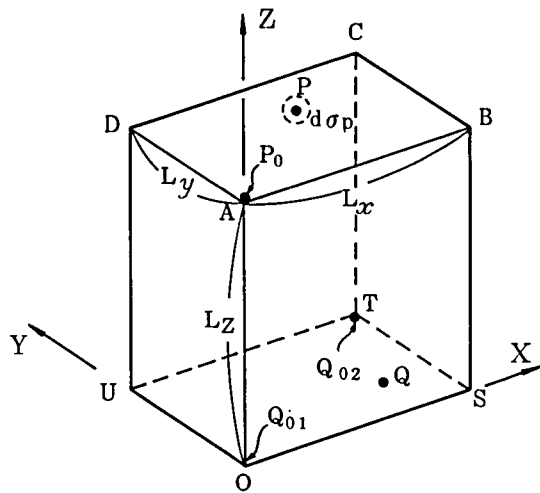


図 4 - 5 受光モジュールの寸法および入射面上の点Pと受光面上の点Qとの関係を示す図

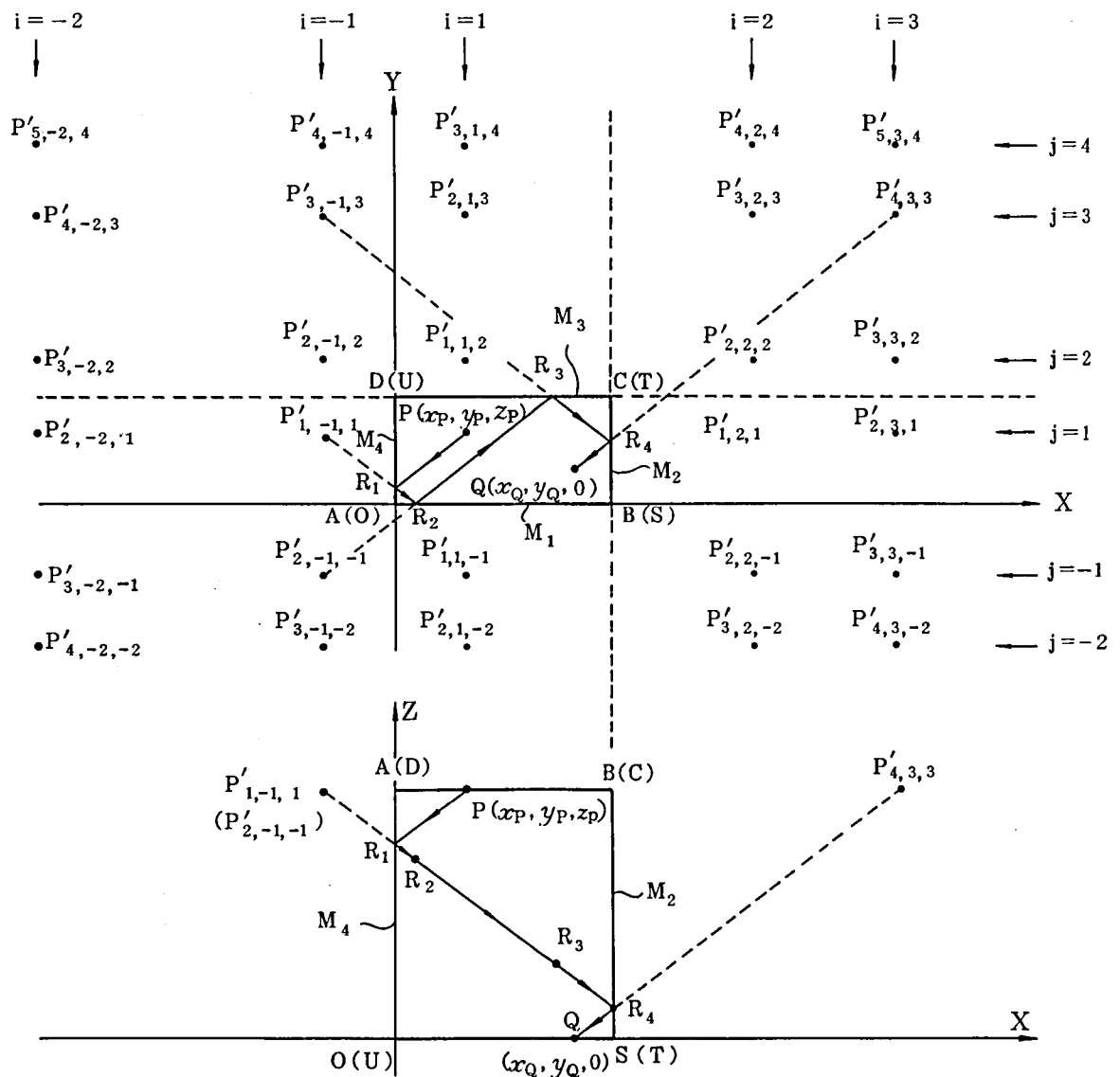


図 4 - 6 光入射面上の点Pから出た光が受光面上の点Qに入射する経路

面の微小面として均等拡散透過面と仮定し、その面積を $d\sigma_p$ 、放射発散度を M_p とすると、この微小面からの光による座標 $(X_q, Y_q, 0)$ にある受光面上の点Qにおける照度 E_{ij} は

$$E_{ij} = \frac{\rho^n M_p d\sigma_p}{\pi} \cdot \frac{z'_{ij}{}^2}{\{(x'_{ij} - x_q)^2 + (y'_{ij} - y_q)^2 + z'_{ij}{}^2\}^2} \quad \dots (4-9)$$

ここに $\text{sign}(a)$ を a の符号、 $\text{MOD}(a, 2)$ は a を 2 で割ったときの余りとすると、

$$X'_{ij} = \text{sign}(i) \{ \text{MOD}(|i|, 2) \cdot X_p + \text{MOD}(|i| + 1, 2) \cdot (L_x - X_p) + (|i| - 1) \cdot L_x \}$$

$$Y'_{ij} = \text{sign}(j) \{ \text{MOD}(|j|, 2) \cdot Y_p + \text{MOD}(|j| + 1, 2) \cdot (L_y - Y_p) + (|j| - 1) \cdot L_y \}$$

$$Z'_{ij} = Z_p$$

入射面のどの部分から出た光であっても、受光面全体にわたって照度 E_q が均一となるための L_x, L_y, L_z は、それが最適の値に設定されない場合に照度が最も不均一となるような点Pと点Qの関係を考えればよい。すなわち図4-5に示す様に点Pとして入射面的一端 P_0 を取り、受光面上には点 P_0 の直下の点 Q_{01} と点 P_0 から最も遠い距離にある点 Q_{02} を選び、この2点の照度をそれぞれ E_{q01}, E_{q02} として、

$$u = E_{q02} / E_{q01} \quad \dots (4-10)$$

なる照度の均一度を定義する。 u が 1 に近いほど受光面での照度は均一に近い。

鏡の反射率 $\rho = 0.87$ として受光モジュールを作る。 $L_y = 1$ =一定として、 $L_x (=k)$ 、 $L_z (=l)$ を変化させたときの均一度 u の変化を図4-7に示す。ある k に対して l を大きくするに従って均一度 u は増加する（良くなる）が、その増加の割合は均一度 u を高く取ろうとするほど l の増加の割合を大きくする必要がある。また均一度 u が 0.9, 0.95 および 0.99 となるとき k と l とは、図4-8のようにほぼ比例関係にある。 $l = 3k$ とする時、均一度 u はほぼ 0.99、 $l = 2.1k$ とする時、均一度 u はほぼ 0.95 となる。

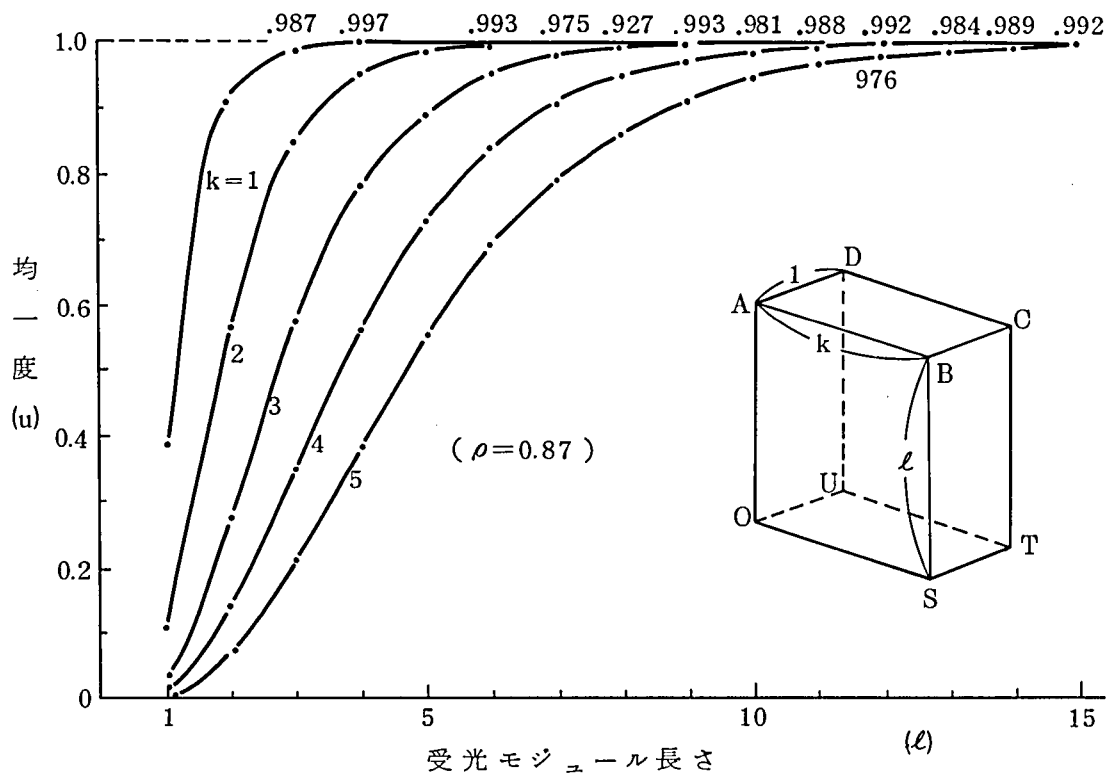


図 4 - 7 受光モジュールの辺比 (k, l) の変化に対する均一度 u の推移

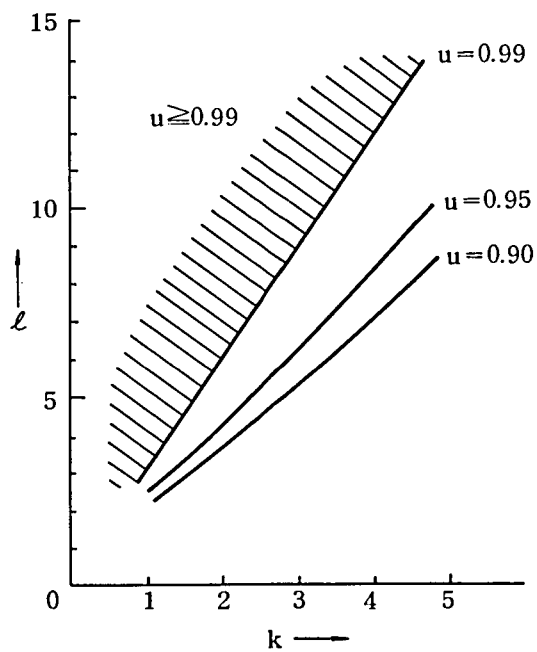


図 4 - 8 指定の均一度 (u) を得るための k と l の関係

4. 3 色分解受光器の設計

4. 3. 1 色フィルタとフォトダイオードの組合わせ

色分解受光器は色ガラスフィルタと受光器を組合わせて作る。受光器は有効感度波長域が広く、小型で任意形状のものが容易に作れるフォトダイオード^{4-3), 4-4)}が適している。フォトダイオード、特にシリコン・フォトダイオードと色ガラスフィルタを組合わせて色分解受光器を構成することにより、かなり任意の分光感度を実現することができるが、設計目的は次の2点に分けられる。

- 1) 人間の眼の分光感度に合わせた色分解受光器を作る場合。
- 2) 視感度特性には必ずしもとらわれず、測定対象物の特性に適合した色分解受光器を作る場合。

である。1)ではいわゆるルータ条件合わせフィルタの設計が必要であり、3～4枚の色ガラスフィルタの組合わせとその厚さの最適設計が不可欠であり、これは4. 3. 2項で述べる。2)の場合には一般に分光感度について厳しい制約がなく、入手可能な色フィルタの中から適したフィルタを直感的に選択組合わせすることで実用上十分である。ただしこの場合できるだけ透過率が高く明るいフィルタを選定し、感度の高い色分解受光器を構成する事が重要である。

標準の市販色ガラスフィルタとシリコン・フォトダイオード（低容量プレーナ拡散型）を組合せ、可視波長域をB, G, Rの3波長帯に、近赤外波長域をIRの1波長帯に分割し、4波長帯の色分解受光器を構成した場合の一例として、その分光感度曲線を図4-9に、組合せフィルタと感度を表4-1に示す。各波長帯の受光器は市販標準フィルタを使用してできるだけ明るい受光器を構成するように配慮しているが、図4-9及び表4-1からも明らかな様に、長波長側の波長帯と短波長側の波長帯とで感度に大きな差が生じる。感度の悪い波長帯の受光器の検出信号S/N値は低く、測定精度は最低感度の受光器のS/Nで決る。MDモジュールは複数波長帯の各受光器に対して有効受光面積を任意に割当てることが容易にできるから、感度の低い波長帯には多くの有効受光面積を割当てること、理想的には色分解受光器の感度に逆比例して有効受光面積を割当てることにより、最終的な測定精度をより高く保つことが可能である。一例として図4-10にB, G, R, IR受光器の有効受光面積を3:2:1:1に割り付けた場合の状況を示す。

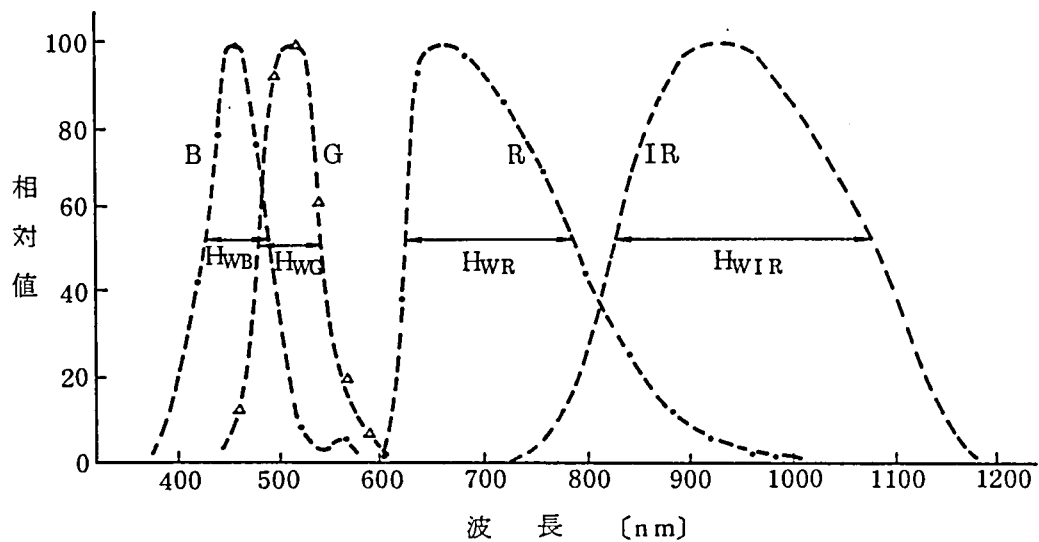


図 4 - 9 フォトダイオードと色ガラスフィルタの組合せによる
色分解受光器の分光感度例

表 4-1 色分解受光器の構成フィルターと感度の例

	付加色ガラス・フィルタ	ピーク波長	半値幅	感 度 (A光源照明下)
B波長域	VV-44	450nm	65nm	331 μ A/qm
G波長域	VG-62	520nm	65nm	485 μ A/qm
R波長域	VR-62 , IRQ -80	660nm	160nm	1488 μ A/qm
I R波長域	IR-D2	920nm	255nm	2734 μ A/qm

2

(受光器： 低容量プレーナ拡散型フォトダイオード10×10mm)

B	G	R	IR
---	---	---	----

B	G	R	B	IR	G	B
---	---	---	---	----	---	---

図 4-10 有効受光面積の配分例

4. 3. 2 計算機によるフィルター厚みの最適設計

等色関数のような特定の曲線に精度良く一致した分光感度をもつ色分解受光器を構成するためには、標準色フィルタの組合わせだけでは十分な近似は得られない。フィルタの最適組合わせとともにガラスフィルタの厚みの最適設計が不可欠である。1個の受光器と n 枚の色ガラスフィルタを組合せて、目的とする分光感度を近似的に実現するためには、波長 λ_i において次式⁴⁻²⁾が成立しなければならない。

$$P_i \prod_{j=1}^N t_{ij}^{d_j} = \alpha \cdot Q_i, \quad i = 1 \sim H \quad \dots (4-11)$$

ただし、 i : 波長サンプリング点の番号

j : 色フィルタの番号

P_i : プランク受光器の分光感度 (波長 λ_i)

Q_i : 目的とする分光感度 (波長 λ_i) , α : 比例系数

d_j : j 番目色ガラスフィルタの厚さ

t_{ij} : j 番目色ガラスフィルタの単位厚さにおける分光透過率 (波長 λ_i)

$\alpha = 1.0$ とおけるように P_i , Q_i , t_{ij} を相対値 (特定波長での値に対する相対値) で表わし、さらに式 (4-11) を対数の形で示すと、

$$\sum_{j=1}^N d_j \cdot \ln(t_{ij}) = \ln(Q_i) - \ln(P_i) \quad \dots (4-12)$$

一般に分光感度を十分に良く一致させるためには、波長サンプリング点数は $H > 10$ であり、他方使用するフィルタの数は実用的には $N < 5$ である。すなわち $N < H$ であり式 (4-12) から d_j は一義的に定まらないから、最小自乗法により解を求める。式 (4-12) に対し W_i の重みを加え最小自乗法による正規方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^H W_i \cdot \ln(t_{ik}) \cdot \ln(t_{ij}) \cdot d_j \right\} \\ & = \sum_{i=1}^H W_i \cdot \ln(t_{ik}) \{ \ln(Q_i) - \ln(P_i) \} \quad \dots (4-13) \end{aligned}$$

$k = 1 \sim N$

重み関数 W_j は主要な波長域とそうでない波長域（感度ゼロの波長域など）とで自乗誤差に重みを付けるのが目的であり、 $W_j = Q_j$ として実用上効果が大きい。式（4-13）から目的とする分光感度との誤差の自乗和を最小とする N 枚の色ガラスフィルタの厚さ $d_1 \sim d_N$ が一義的に決まる。しかし式（4-13）は単なる数学的な関係式であるから、適当なフィルタを N 種類選んでこの計算を行うと、 d_j の中には負の値や実用上無意味な大きい値の解が出ることも十分有り得る。計算機による最適厚み設計の場合には、種々の物理的制約を考慮した計算が必要である。具体的には d_j の値の中で負または制限肉厚の下限を下まわる値となるフィルタが有れば、そのフィルタを除き他のものの組合せについて計算を繰返し行う。さらに d_j の値の中であらかじめ定めた制限厚さを越えるフィルタがあれば、それを制限厚さに固定して計算を繰返すなどの処理が必要である。この様な設計計算プログラムの概略フロー図を図4-11に示す。

シリコンフォトダイオードをブランク受光器とし、この設計方法によりルータ条件合わせ（等色関数 $\bar{Y}(\lambda)$, $\bar{X}_2(\lambda)$, $\bar{Z}(\lambda)$ への一致）を行なった場合の一例を図4-12、(A), (B), (C) に示す。この図において (A), (B), (C) はそれぞれ等色関数 $\bar{Y}(\lambda)$, $\bar{X}_2(\lambda)$, $\bar{Z}(\lambda)$ に対する最小自乗近似分光感度と、理想関数からの偏差を表わしている。ルータ条件合わせ受光器に対する許容誤差（JIS-Z8724）は $\bar{Y}(\lambda)$ に対して ± 0.1 以内、 $\bar{X}_2(\lambda)$ に対して ± 0.15 以内、 $\bar{Z}(\lambda)$ に対して ± 0.40 以内である。図4-12に示した例ではいずれも十分に許容誤差以内であり、産業的に応用する上で人間の色覚特性に十分近似した受光器が得られることがこの結果からわかる。この様にして得られる受光器で物体色を測定した場合の測色精度については次節で検討する。

4. 4 色分解受光モジュールの評価

4. 4. 1 色分解受光モジュールの使用形態

MDモジュールは紙、布、プラスチックなどのように面状で光透過性のある物体の測色に特に適している。MDモジュールの代表的な使用形態を図4-13に示す。図4-13で (A) は検査対象物 (OJ) の透過光を直接受光する場合、(B) は検査対象物 (OJ) の反射光を直接受光する場合を示す。(C) は結像レンズ (L) で測定対象物 (OJ) の像を一旦作りMDモジュールで受光している場合を示す。(D) は検査対象物 (OJ) の透過光と反射光を直接同時に受光している状況を示す。この様に測定対象物の形や測定内

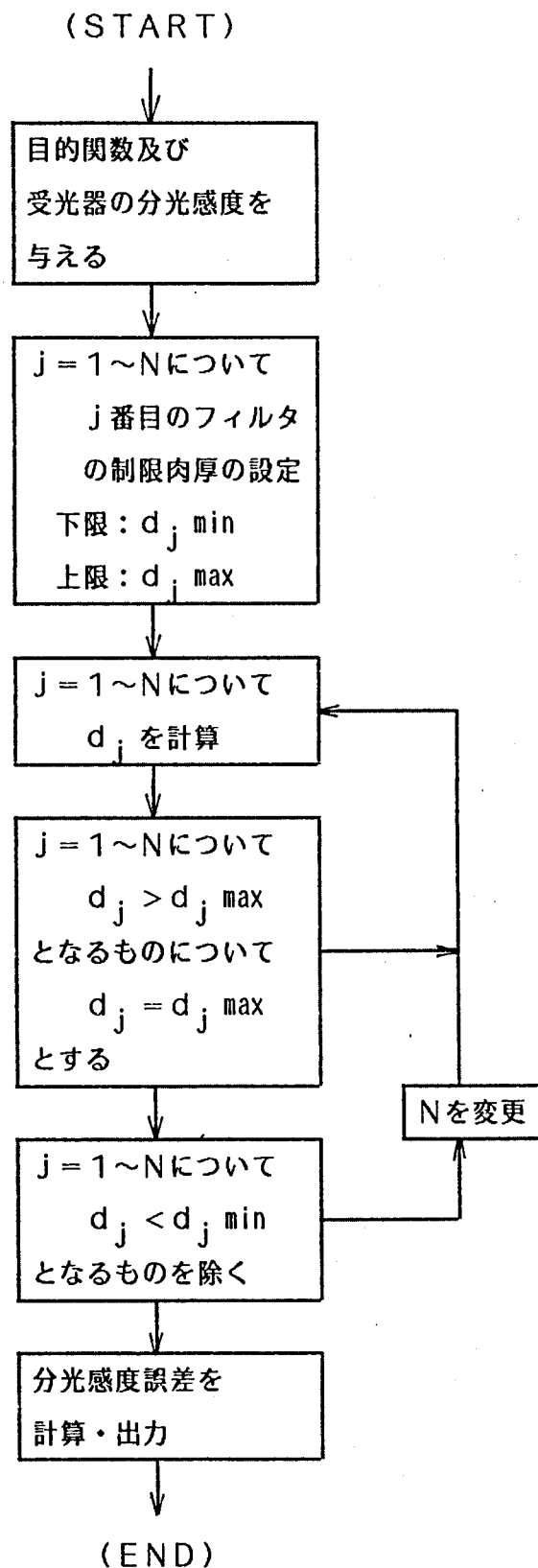


図 4-11 最適フィルタ肉厚設計計算プログラムの概略フロー図

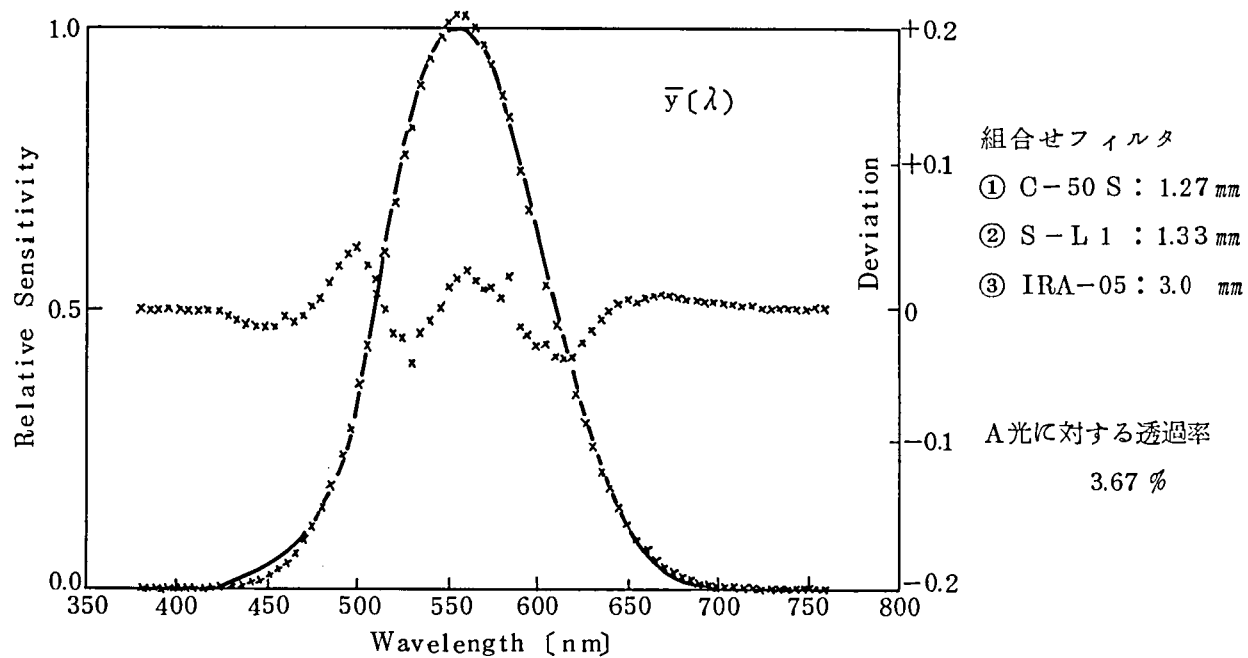


図 4 - 12(A)

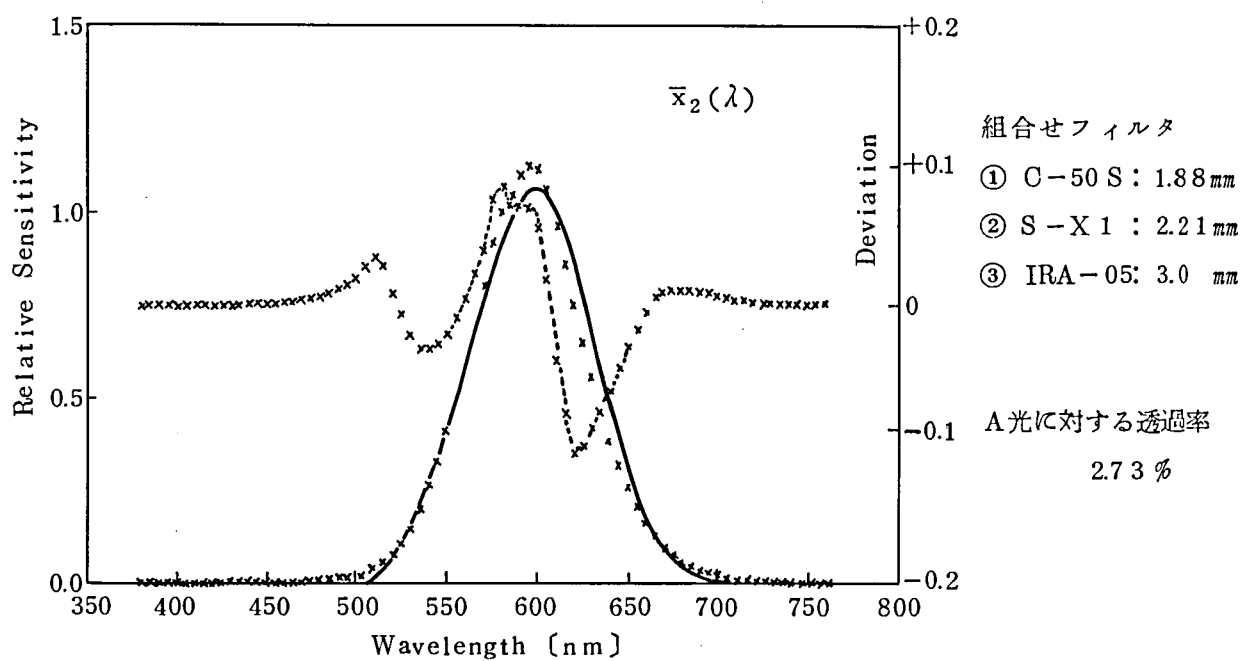


図 4 - 12(B)

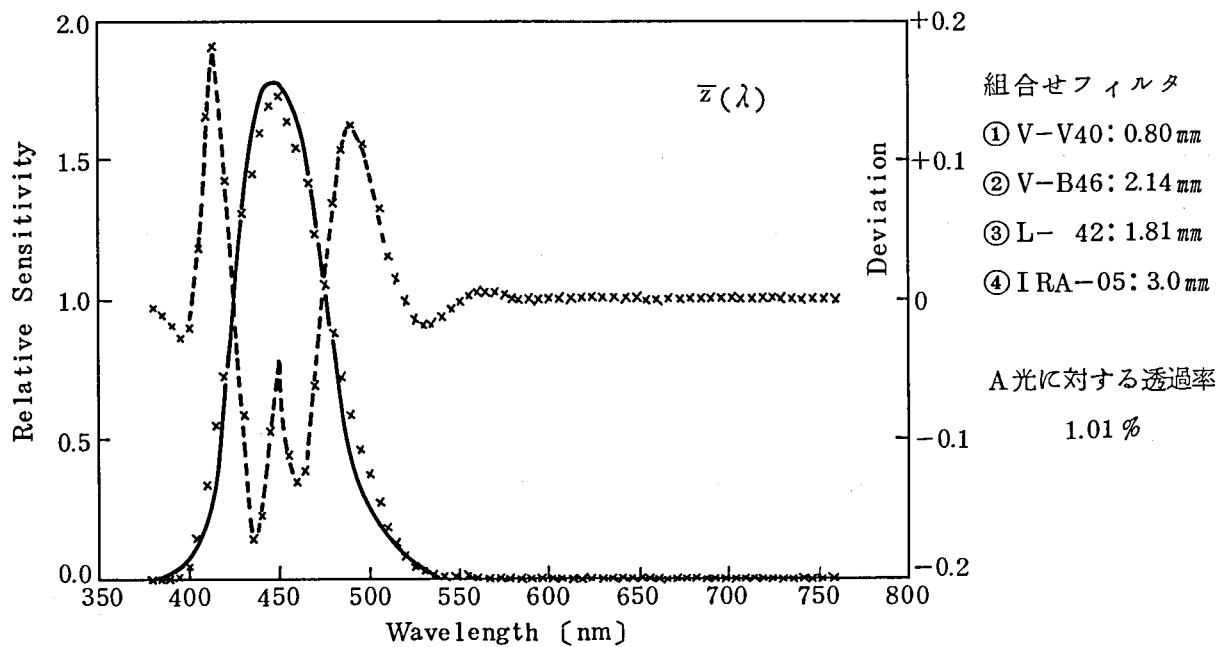


図 4 - 12 (C)

図 4 - 12 シリコンフォトダイオードを使用してルータ条件合わせ受光器を設計した場合の分光感度偏差。(設計例)

- (A) : $\bar{y}(\lambda)$ 用組合せフィルタと分光感度偏差
 (B) : $\bar{x}_2(\lambda)$ 用組合せフィルタと分光感度偏差
 (C) : $\bar{z}(\lambda)$ 用組合せフィルタと分光感度偏差

容に応じて多様な使い方が考えられる。

MDモジュールの受光視野の大きさ（光入射面の大きさ）は測定に必要な面分解能と検出信号の取り方により決る。すなわち、光入射面の大きさで測定範囲のすべてを被うか、検査対象物の移動を利用して出力信号の積分を行い全測定範囲を被うかなどにより決る。この間の関係を図4-14に示す。広い範囲を均一に照明する事は困難であり、さらにMDモジュールは高速に搬送される検査対象物の色を高速・高精度に測定する事が主目的であるから、MDモジュールの受光視野は必要最小限とし、出力信号の積分でより広い範囲の測定を行う方式が実用上は好ましい。

4. 4. 2 他の色分解受光方式との比較

色分解受光を行う方法としては、図4-15(A)に示すように結像レンズLにより測色対象物の像を作り、ダイクロイックミラーで波長分離を行った後、色分解受光器 D_1 、 D_2 、 D_3 で受光する方法が一般的である。測色対象物は完全拡散面であると考え、測定対象領域から ϕ_0 の光束が発生し、受光器への入射光束が ϕ_p であるとすれば、この光電系の受光効率 α_1 [%]は次式⁴⁻⁵⁾で表わされる。

$$\alpha_1 = 100\phi_p / \phi_0 = (100/4F^2) \{m/(m+1)\}^2 T_L T_{H1} T_{H2} \quad \dots (4-14)$$

ただし、 F : レンズのF値 ($= f/2r$, f : 焦点距離, r : レンズ半径)

m : 結像倍率

T_L : レンズの透過率

T_{H1} 、 T_{H2} : ダイクロイックミラーの透過率あるいは反射率

一方図4-15(B)に示すMDモジュールによる色分解受光系において、受光効率 α_2 [%]は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 100\phi_p / \phi_0 = 100T_D \cdot \eta \cdot (S_D / S_0) \\ &\approx 100T_D \cdot \eta \cdot (1/N) \end{aligned} \quad \dots (4-15)$$

ただし、 T_D : MDモジュール入射面拡散板の透過率

η : MDモジュール光伝達率

S_D : 色分解受光器の有効受光面積

S_0 : MDモジュール入射面の面積、 N : バンド数

典型的な場合として、 $T_L = 0.81$ 、 T_{H1} 、 $T_{H2} = 0.85$ 、 $T_D = 0.5$ 、 $N = 3$ の状態における受光効率 α_1 と α_2 を図示すると図4-16となる。図から明らかなように特性の非常に良いレンズ（F値の小さいレンズ）を使用した場合でもMDモジュールによる受光効

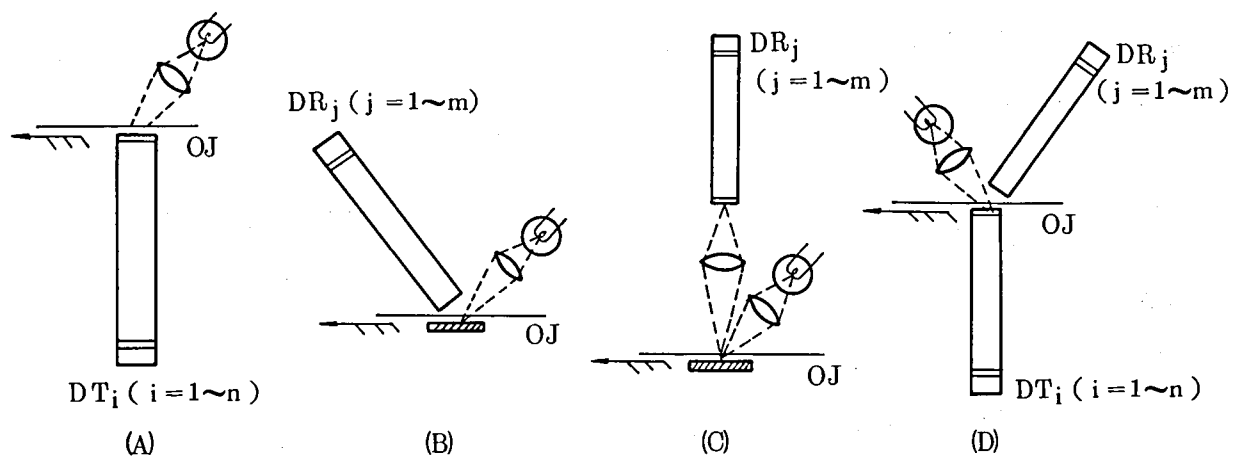


図 4 - 13 色分解受光モジュールの使用形態

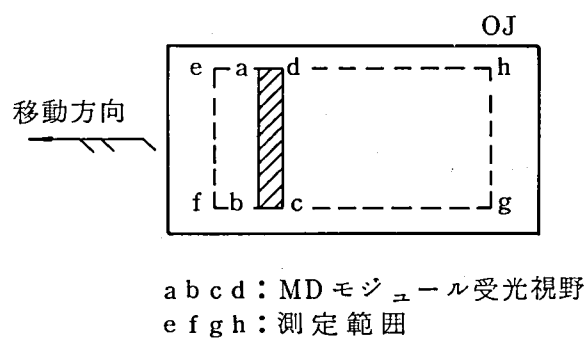


図 4 - 14 測定範囲とMDモジュール受光視野の関係を示す図

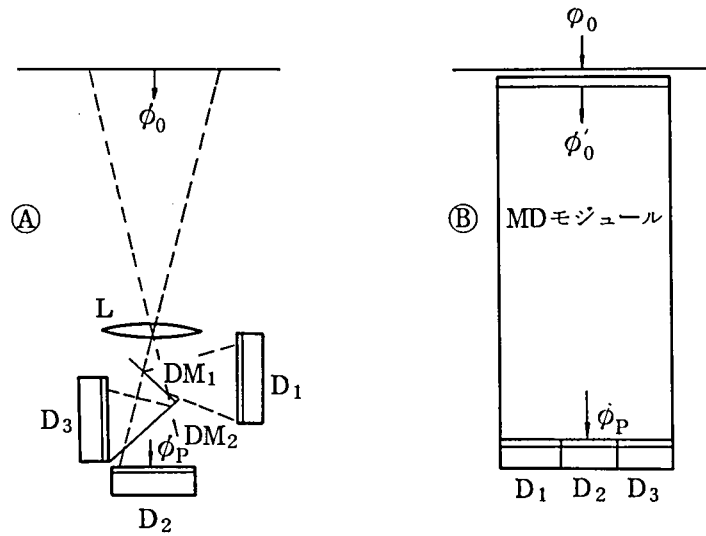


図 4 - 15 ダイクロイック・ミラーによる色分解受光①
と MD モジュールによる受光②の比較図

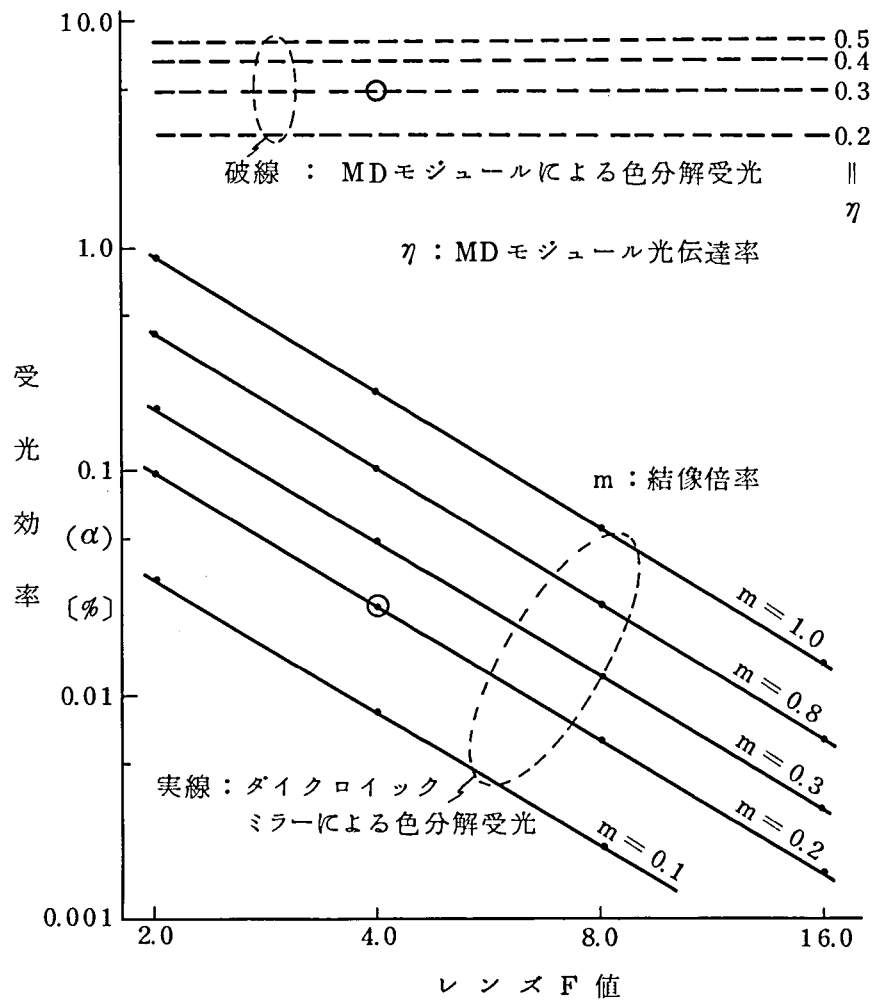


図 4 - 16 MD モジュール使用の場合とダイクロイックミラー
使用の場合の受光効率の比較図

率の方が大幅に上まわっている。標準的な状態 ($F = 4.0$, $m = 0.2$, $\eta = 0.3$) で比較すると、MDモジュールの受光効率は約 200倍高く、結果的に高いS/Nの測色信号を得ることができる。

4. 4. 3 色分解受光モジュールによる測光精度と測色精度

表4-2のように典型的なMDモジュールを取り上げ、これをモデルMDモジュールとして測光精度と測色精度を評価する。

A) 測光精度

標準の光Aを信号光とし、MDモジュール光入射面の照度 E_i に対する色分解受光器 D_n の光電流出力 I_{Dn} は

$$I_{Dn} = E_i \cdot S_D \cdot \eta \cdot T_D \cdot V_n \cdot 10^{-6} \quad [\mu A] \quad \dots (4-16)$$

ただし I_{Dn} : n番目色分解受光器の出力光電流 [μA]

S_D : 受光器の有効受光面積 [mm^2]

η : MDモジュール光伝達率

T_D : MDモジュール光入射面拡散板の透過率

E_i : 信号光照度 [lm / m^2]

V_n : n番目色分解受光器の感度 [$\mu A / lm$]

上記のモデルMDモジュールについて信号光照度 (E_i) に対する色分解受光器の出力光電流を図示すると図4-17となる。出力光電流は受光器面積に比例した値であるから図4-17では単位面積当りの出力を示している。この図には図4-9に示した4バンドの色分解受光器の出力光電流をあわせて示した。ルータ条件合わせ受光器 (D_Y , D_{X2} , D_Z) は単なる色分解受光器 (D_B , D_G , D_R , D_{IR}) と比較し感度は $1/4 \sim 1/6$ になるが、等色関数との一致精度を十分に高めるには感度低下はやむをえない。

図4-17から明らかなようにルータ条件合わせ受光器の中で D_Z が最も感度が低いから、ここでは受光器 D_Z の測光誤差について検討する。モデルMDモジュールの受光器 D_Z の光電流出力 I_Z は

$$I_Z = 0.15 \cdot E_i \cdot S_D \cdot 10^{-4} \quad [\mu A] \quad \dots (4-17)$$

となる。出力光電流は E_i , S_D に比例し、これを大きくするほど光電流も大きく取れ、誤差の少ない光電信号が得られるが、 S_D は測定領域の大きさで左右され、 $10 \sim 100 mm^2$ が実用的な範囲である。 E_i は照明系の大きさや発熱の関係からできるだけ小さい方が望

表 4-2 モデルMDモジュールの特性諸元

ミラーボックス辺比	$1 : k : \ell = 1 : 3 : 9$
ミラー反射率	$\rho = 0.87$
信号光伝達率	$\eta = 0.37$
受光均一度	$\mu = 0.99$
光入射面拡散板透過率	$T_D = 0.5$
色分解受光器	ルータ条件合わせ3受光器 (特性は図4-12)

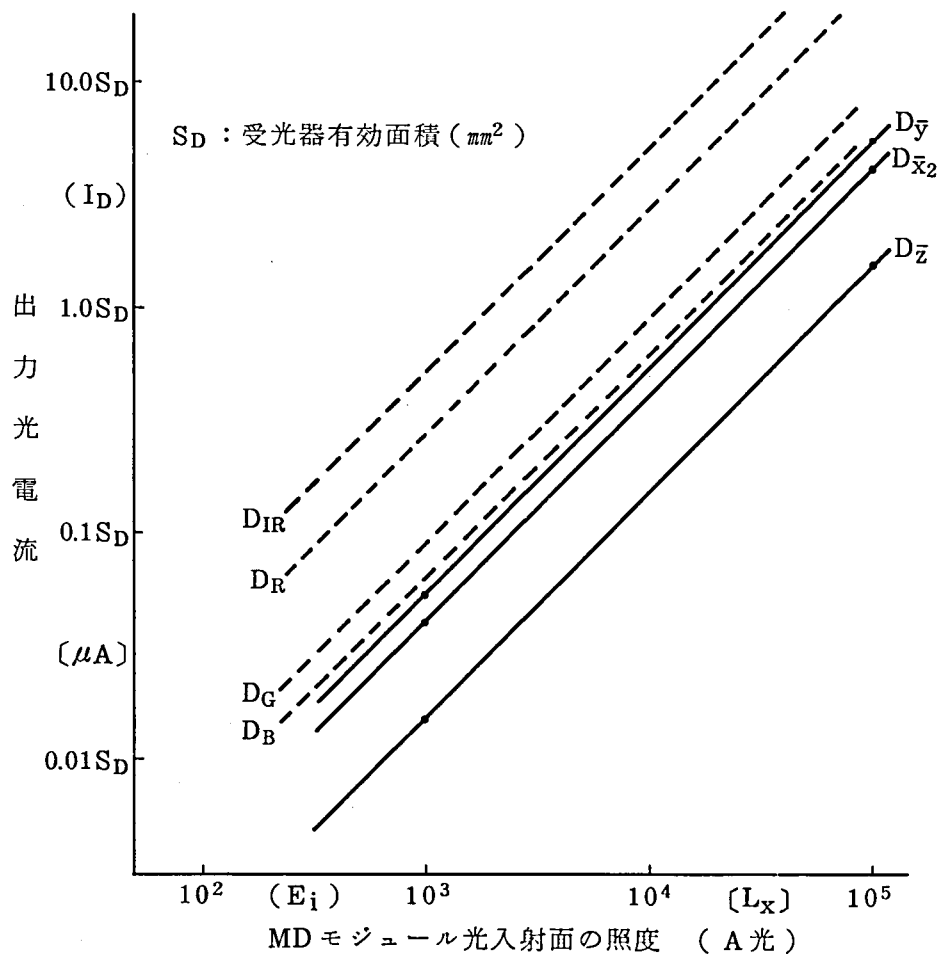


図 4 - 17 モデルMDモジュールにおける入射光照度と出力光電流の関係を示す図

ましいが、 10^4 lx 以下であれば技術的に無理のない値である。 $E_i = 10^4$ lx とする時、 $S_D = 10\text{mm}^2$ の場合 $I_z = 1.5\mu\text{A}$ 、 $S_D = 100\text{mm}^2$ の場合 $I_z = 15\mu\text{A}$ となる。

一方フォトダイオードを使用し、演算増幅器、AD変換器と組み合わせてデジタル測色系を構成した場合の総合誤差例を第2章図2-12に示した。この図から、光電流 $I_s = 1.5\mu\text{A}$ ($R_f = 7\text{M}\Omega$) の時、光電信号の総合誤差 E_T は 0.035%、光電流 $I_s = 15\mu\text{A}$ ($R_f = 0.7\text{M}\Omega$) の時、総合誤差 E_T は 0.025% である。この例から明らかなようにMDモジュールによる測定では技術的に無理のない照明光量のもとで誤差 0.1% 以下の精度の測光が可能である。

B) 測色精度

測色精度評価用の物体色として16種の演色評価色票 (No.1 は標準白色面、No.2 ~ 9 は平均演色評価用 J I S 試験色、No.10~15 は特殊演色評価用 J I S 試験色) を取り上げ、この色票をモデルMDモジュールで測色した場合の誤差 (色度図上でのずれ Δx , Δy および明度のずれ ΔY を計算機で推定) を表4-3に示す。ここでNo.1 ~ No.9 の色票は比較的彩度の低い物体色見本、No.10~No.15 は比較的彩度の高い物体色見本であるが、低彩度の物体色では色度のずれ ($\pm \Delta x$, $\pm \Delta y$) は ± 0.009 以内、比較的彩度の高い物体色でも色度のずれは ± 0.019 以内となっている。明度のずれ ($\pm \Delta Y$) はいずれの場合も $\pm 0.17\%$ 程度に納まっている。人間の色覚特性を近似する目的には十分な精度が得られている。ただし、一対比較の場合人間の目は色度図上で ± 0.001 程度の差の色まで識別可能であるから、人間の色識別限界ぎりぎりの判別を機械化する場合には、ルータ条件合わせを行なった受光器であっても測色絶対値で判別することは困難であり、個々の測色系における相対値で判別する必要がある。相対的な測色値であれば4.4.3項A) に示した様にMDモジュールを使用すれば誤差 0.1% 以下の測光が容易であるから、人間の目の色識別能力限界以上の高精度の色識別が可能であると言える。

4.5 まとめ

物体からの反射光あるいは透過光を効率良く色分解受光する方法として、色分解受光モジュール (MDモジュール) を提案し、その設計方法と測色性能について述べた。MDモジュールはフォトダイオードと色フィルタおよびミラーボックスで構成し、測色対象物体

表 4-3 フォトダイオードを使用したルータ条件合わせ受光器で
物体色見本を測定した時の測色誤差の例

色票番号	物体色見本の色度座標値及び明度			ルータ条件合わせ受光器による測色誤差		
	x_0	y_0	Y_0	Δx	Δy	ΔY
No. 1	.446	.403	100.00	-0.002	-0.004	0.0
2	.506	.390	32.57	-0.004	-0.004	-0.14
3	.494	.425	30.48	-0.003	-0.005	-0.06
4	.461	.469	30.57	-0.004	-0.009	0.10
5	.397	.463	27.12	0.002	-0.008	0.13
6	.383	.415	28.26	0.002	-0.005	0.12
7	.378	.368	27.31	0.001	-0.003	0.11
8	.438	.356	29.61	-0.003	-0.002	0.03
9	.484	.358	33.89	-0.007	-0.001	0.02
10	.632	.327	16.61	-0.019	0.004	0.02
11	.513	.443	63.61	-0.005	-0.006	-0.09
12	.358	.480	17.72	0.003	-0.010	0.13
13	.219	.260	4.54	0.009	0.001	0.09
14	.496	.404	61.14	-0.003	-0.004	-0.17
15	.451	.461	11.69	-0.004	-0.009	0.05

の比較的広い領域の平均色を、高速・高精度に測定する事を目的としている。本章の主な内容は、

- 1) MDモジュールのミラーボックスの設計は複数の色分解受光器の受光の均一性と、信号光伝達率とのかね合で決める。ミラーボックス入射開口部の長辺を k 、ミラーボックスの長さを l とする時、 $3k \leq l \leq 5k$ となる様に設定すれば、信号光伝達率が20%以上、受光の均一度が 0.99 以上となりMDモジュールの効果を十分発揮することができる。
- 2) 色分解受光器はフォトダイオードと色ガラスフィルタの組合せで作る。任意分光感度に合わせるための組合せフィルタの厚み設計には最小自乗法が有効である。この方法によりフォトダイオードを使用してルータ条件合わせ受光器を作れば、色度のずれ (Δx , Δy) が ± 0.02 程度以内、明度のずれ (ΔY) が $\pm 0.2\%$ 程度以内で物体色測定が可能であり、自動化装置用の測色装置として十分な特性が得られる。
- 3) 結像レンズとダイクロイック・ミラーを使用する色分解受光方式と比較して、MDモジュールでは数十～数百倍の受光効率を得ることができる。結果的に高い S/N の測光信号を得ることができるから、照明系の負担を軽くして有効3桁の精度の測光が可能となる。

MDモジュールは色分解受光に広く応用可能であるが、特に平板な物体の比較的広い部分の反射平均色や透過平均色を測定する場合に有効である。本MDモジュールは後章で述べる色彩印刷物判別装置の光電計測系として適用し、その効果・有効性を示した。

第五章 計算機シミュレーションによる調色 自動化の基礎的検討^{5-8), 5-9)}

5. 1 はじめに

染色や着色など色を扱う工程でまず処理しなければならない問題は目的の色を出す処方の決定、すなわち手持ちの色材をどの様に配合すれば色見本と同一の色が得られるか、を知る事である。この処方を決定すること（調色あるいはカラーマッチングと呼ぶ）は、これまで多くは目視により経験と勘にたよる方法で処理されて来たが、その場合、

- 1) 高度の熟練作業が必要である。また熟練者と言えども試行錯誤的な方法を取るため少なからず人手と時間がかかる。
- 2) 人の目で処理する場合、色合せの際の条件等色（メタメリズム）や演色性の評価が困難であり、品質管理面で難点がある。

などの問題があり、調色の機械化・自動化が望まれ各所で計算機を応用した調色機械化の研究開発が進められて来た。

計算機による調色計算の理論的裏付けは、色材の吸収係数（ K ）と散乱係数（ S ）を想定した二定数理論⁵⁻²⁾と、複数の色材を混合する際の個々の定数の加法性理論⁵⁻³⁾であるが、これらの理論には多くの近似や仮定が含まれているため、色合わせ精度を実用レベルにまで高めるためには、分光測定値の界面反射補正や基準色材定数の折線近似など、少なからず経験的に決まる要因をも加味する必要がある。これら経験的因子の最適値を見出すことは、計算機による色合わせの精度向上に重要である。

調色計算の問題の解析手段として最も基本的な方法は、経験的因子の値を順次変更させ計算された処方に基づき配合試験を繰り返し、その結果を色見本と比較しつつ、試行錯誤的に各因子の最良点を見出すことであるが、膨大な数に及ぶ配合試験とそれに伴う視感判定や測色評価は大変な労力と時間がかかる。また、あえてこの方法を取るとしても、配合試験結果と色見本との間の色ずれが、測定誤差に起因するか、色材の経年変化に起因するか、配合試験の誤差に起因するか、調色計算の理論的不備に起因するか等々、解析は非常にやっかいなものになる。

本章では、計算機によるシミュレーション手法を色合わせ評価の問題に適用し、簡便で一般的な色合わせ評価方法を検討する。ここでシミュレーションの対象は、色材配合比率

があらかじめわかっている色見本（あるいは色見本群）に対し、調色計算を実行し、得られた結果（色材の配合比率、すなわち処方）の色合わせ精度を評価することである。このシミュレーションにより、上記のような困難や不備をまねく色材配合試験と視感判定、あるいは配合試験と測色評価の過程を経ずに、種々の因子の最適値を決定することが可能となる。

本章ではまずシミュレーションの具体的方法を示し、次に次章の準備としてこのシミュレーション手法を応用して調色計算に関する基礎的な問題の解析を行なう。

5. 2 色合わせ評価シミュレーション計算の根拠

5. 2. 1 基礎式

q 個の色材を考える。それぞれの単独の色材を白色下地あるいは、白色色材と混合して得られる色の分光反射率 (R) は、波長 (λ) および色材濃度 (C) の関数であり、それぞれ次のように表わされる。

$$R_i = H_i(\lambda, C_i), \quad i = 1 \sim q \quad \dots (5-1)$$

色材の混合に関しては、二定数理論に基づくクベルカムンク式^{5-1), 5-2)}、すなわち

$$Q = K/S = F(R) = (1-R)^2 / 2R, \quad 0 \leq R \leq 1 \quad \dots (5-2)$$

ただし、 K : 色材の吸収係数、 S : 色材の散乱係数

が通常よく使用されるが、式 (5-1) に対し式 (5-2) の変換を加え次の関係を得る。

$$Q_i = F(R_i) = G_i(\lambda, C_i) \quad \dots (5-3)$$

白色色材あるいは白色下地の S に対し、他の色材の S が無視できるほど小さい場合、 q 個の色材をそれぞれ濃度 C_1, C_2, \dots, C_q で混合すれば次の関係が成立する⁵⁻³⁾。

$$Q_m = \sum_{i=1}^q \{ G_i(\lambda, C_i) - Q_0 \} + Q_0 \quad \dots (5-4)$$

ただし、 Q_0 : 白色下地あるいは白色色材の K/S 値

大部分の色材について濃度 C の広い範囲では、上記の線形性はよくないが、 C の小さい範囲において十分線形性が成立する。したがって Q_m に関し色材の混合比率が $\Delta C_1, \Delta C_2, \dots, \Delta C_q$ 変動した場合を Q_m' とすると、次の関係が成立する。

$$Q_m' = \sum_{i=1}^q \{ G_i(\lambda, C_i + \Delta C_i) - Q_0 \} + Q_0 \quad \dots (5-5)$$

$$= \sum_{i=1}^q \{ G_i(\lambda, C_i) - Q_0 \} + Q_0 + \sum_{i=1}^q \left(\frac{\partial G_i}{\partial C} \right)_{C_i} \cdot \Delta C_i$$

$$= Q_m + \sum_{i=1}^q \left(\frac{\partial G_i}{\partial C} \right)_{C_i} \cdot \Delta C_i \quad \dots (5-6)$$

いま q 個の色材が、それぞれ $C_1^s, C_2^s, \dots, C_q^s$ で混合されてできた色見本 $R_s(\lambda)$ に対し、調色計算^{*}を実行した結果、 $C_1^m, C_2^m, \dots, C_q^m$ なる解を得、 $(C_i^s - C_i^m)$ が小さい場合には、調色計算により得られた処方 $(C_1^m, C_2^m, \dots, C_q^m)$ に基づく試験配合結果の分光反射率 $R_m(\lambda)$ は、式(5-6)から次のように表わされる。

$$Q_m = F(R_s) + \sum_{i=1}^q \left(\frac{\partial G_i}{\partial C} \right)_{C_i^s} \cdot (C_i^m - C_i^s) \quad \dots (5-7)$$

$$R_m = F^{-1}(Q_m) \quad \dots (5-8)$$

ただし、 F^{-1} は式(5-2)の逆関数、すなわち

$$R = F^{-1}(Q) = (1 + Q) - ((1 + Q)^2 - 1)^{1/2} \quad \dots (5-9)$$

式(5-7)、(5-8)で定まる R_m と R_s の色ずれについて公知の色差公式を適用すれば、色合わせ精度(記号 Mf で表記)最終的に色差値 ΔE で表わされる。

$$Mf = \Delta E = f(R_m, R_s) \quad \dots (5-10)$$

ただし、 f =色差公式

以上式(5-7)、(5-8)、(5-10)に示すように、あらかじめ色材混合比率がわかっている色見本群をサンプルとして扱うとき、色合わせ精度は色材の試験配合と視感判定、あるいは色材の試験配合と測色の手続きなしに、数式モデルを通じて、最終的に次元量(ΔE)によって評価可能である。

^{*} 式(5-4)において解 C_i を求める計算。 $G_i(\lambda, C_i)$ を線形近似あるいは折線近似して解 C_i を求める。

5. 2. 2 色合わせ評価のためのシミュレーション計算式

色合わせ評価シミュレーション計算の基準は、色見本あるいは基準色材の分光反射率関数（式（5-1））であるが、一般にこれを初等関数で表記することはできないので、 λ とCに関するサンプリングデータで代用する⁵⁻⁵⁾。したがってシミュレーション計算で扱うデータは、すべてベクトルあるいはマトリックスとして表わされるが、これに対する記号を下記のように定める。

R_s : 色見本分光反射率ベクトル

R_M : 調色計算により得られた処方に基づき、q個の色材を混合して得られる分光反射率ベクトル

R_{Ai} : i番目色材規定濃度における分光反射率マトリックス

R_W : 無着色下地分光反射率ベクトル

C_0 : 基準色材の規定濃度マトリックス

C_s : 色見本の色材配合濃度ベクトル

C_M : R_s に対し調色計算を実行して得られた処方ベクトル

分光反射率値として与えられる上記の R_s 、 R_W 、 R_M 、 R_{Ai} の各要素に対し、それぞれ式（5-2）変換を加えて Q_s 、 Q_W 、 Q_M 、 Q_{Ai} を得る。それぞれ次のように定める。

$$Q_s = \begin{bmatrix} Q_{s1} \\ \vdots \\ Q_{sn} \end{bmatrix}, \quad Q_M = \begin{bmatrix} Q_{M1} \\ \vdots \\ Q_{Mn} \end{bmatrix}, \quad Q_W = \begin{bmatrix} Q_{W1} \\ \vdots \\ Q_{Wn} \end{bmatrix}$$

$$Q_{Ai} = \begin{bmatrix} a_{11}^i & \cdots & a_{1k}^i \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}^i & \cdots & a_{nk}^i \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} i : \text{基準色材番号指標}(1 \sim q) \\ n : \text{波長サンプリング点数} \\ k : \text{規定濃度点数} \end{array}$$

また、

$$C_0 = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{q1} & \cdots & C_{qk} \end{bmatrix}, \quad C_s = \begin{bmatrix} C_{s1} \\ \vdots \\ C_{sq} \end{bmatrix}, \quad C_M = \begin{bmatrix} C_{M1} \\ \vdots \\ C_{Mq} \end{bmatrix}$$

このとき式（5-7）の関係は次のように表わされる。

$$Q_M = Q_s + P \cdot \Delta C \quad \cdots (5-11)$$

ただし、

$$\Delta C = C_H - C_S = \begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \vdots \\ \Delta C_q \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1q} \\ \vdots & P_{jj} & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nq} \end{bmatrix}$$

: 色材k/S 値の濃度に関する微係数
マトリックス (折線近似)

$$P_{ii} = \begin{cases} \frac{a_{ik}^i - a_{ik-1}^i}{C_{ik} - C_{ik-1}} & : C_{ik-1} \leq C_{si} \leq C_{ik} \text{ のとき} \\ \frac{a_{i1}^i - Q_{wi}}{C_{i1}} & : 0 \leq C_{si} < C_{i1} \text{ のとき} \end{cases}$$

Q_H の各要素に対し、式 (5-9) の変換を加え R_H が定まる。

$$R_H = \begin{bmatrix} R_{H1} \\ \vdots \\ R_{Hn} \end{bmatrix} = F^{-1}(Q_H) \quad \dots (5-12)$$

R_H と R_S 相互の色ずれの評価指標として CIE1964 色差式による色差値を使用する。すなわち色合わせ精度 (Mf) を色差値 ΔE で直接評価するとき、

$$Mf = \Delta E = \{ (U_s^* - U_H^*)^2 + (V_s^* - V_H^*)^2 + (W_s^* - W_H^*)^2 \}^{1/2} \quad \dots (5-13)$$

$$U_s^* = f_1(X_s, Y_s, Z_s), U_H^* = f_1(X_H, Y_H, Z_H)$$

$$V_s^* = f_2(X_s, Y_s, Z_s), V_H^* = f_2(X_H, Y_H, Z_H)$$

$$W_s^* = f_3(X_s, Y_s, Z_s), W_H^* = f_3(X_H, Y_H, Z_H)$$

... (5-14)

$$X_S = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} = k \cdot T \cdot E \cdot R_S, \quad X_H = \begin{pmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{pmatrix} = k \cdot T \cdot E \cdot R_H \quad \dots (5-15)$$

ただし、 f_1, f_2, f_3 : (X, Y, Z) 空間から (U^*, V^*, W^*) 空間への変換関数

$$T = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \dots & \bar{x}_n \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 & \dots & \bar{y}_n \\ \bar{z}_1 & \bar{z}_2 & \dots & \bar{z}_n \end{pmatrix} \quad : \text{CIE スペクトル三刺激値}$$

$$E = \begin{pmatrix} E_1 & \dots & 0 \\ \vdots & E_j & \vdots \\ 0 & \dots & E_n \end{pmatrix} \quad : \text{標準の光 C の分光分布}$$

$1/k = T \cdot E \cdot I$ 、 I : n 次元単位ベクトル

以上式 (5-11) ~ (5-15) を通じて、色合わせ評価シミュレーション計算が可能である。N 個の色見本群を対象にして全体の平均的な色合わせ精度を問題とすることがしばしばあり、また単独の色見本に対する精度よりもこのほうがより全体の傾向をつかむのに好都合であるがこの場合には単純平均を考える。

$$Mf = \Delta E = \sum_{i=1}^N \Delta E_i / N \quad \dots (5-16)$$

5.3 シミュレーション計算プログラムとシミュレーション精度の評価

5.3.1 シミュレーション実行計算機プログラム

色合わせ評価シミュレーション計算のおもな目的は調色計算に関連した種々の経験的に定まる因子 (以下経験的因子と言う) を順次変化させた場合の色合わせ精度の推移、あるいは調色計算式そのものを変えた場合の解の推移状態などを見ることにあるから、色合わせ評価シミュレーション計算プログラムの一部として、調色計算ルーチンを含ませる必要がある。このような構成で上述の式に基づき色合わせ評価シミュレーション計算を実行する場合の計算機プログラムのフロー図は図 5-1 となる。

各ブロックについて簡単に説明すると、

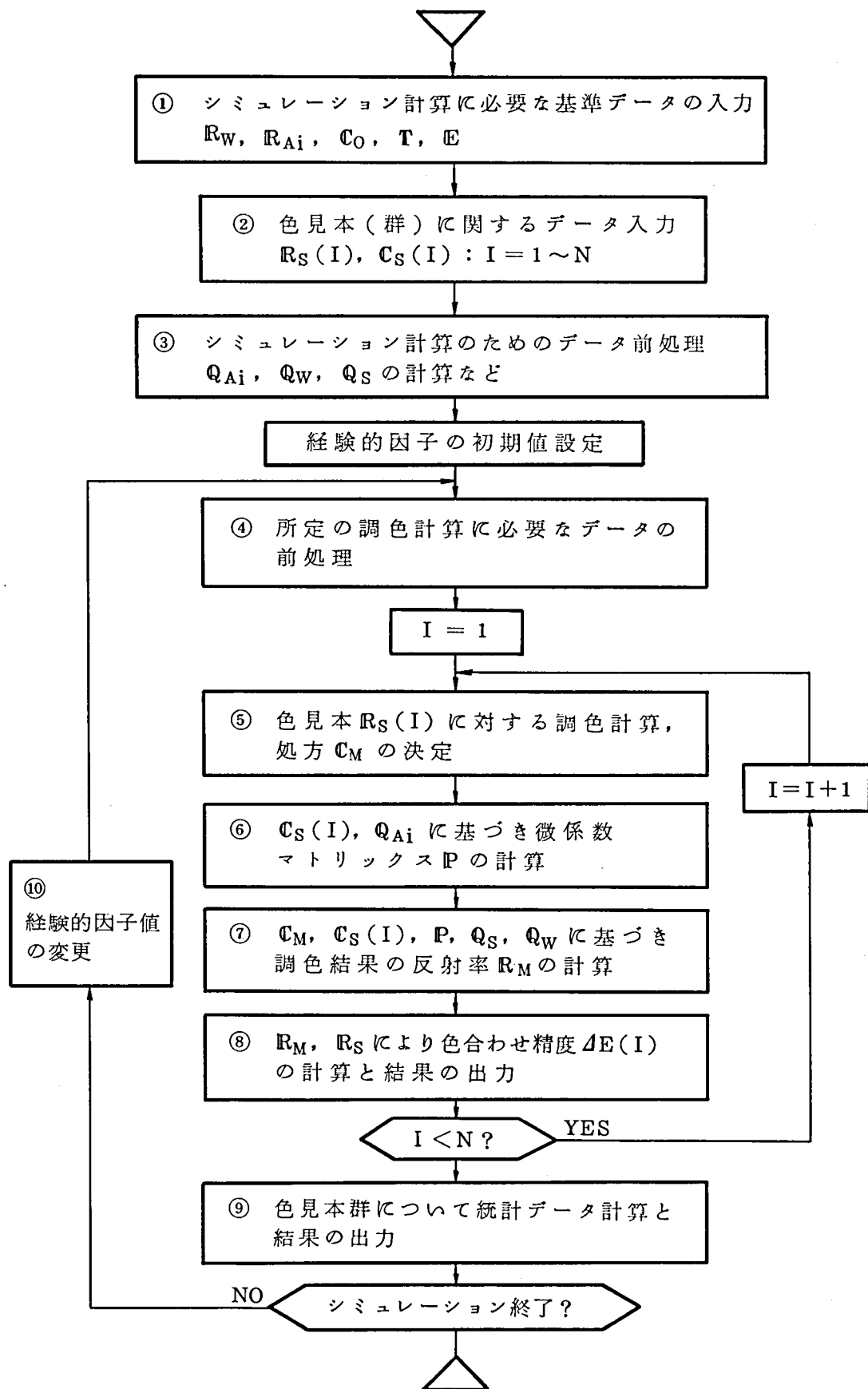


図 5 - 1 色合わせ評価シミュレーション計算のフロー図

① 色合わせ評価シミュレーション計算に必要なデータの入力、これは基準色材に関するデータ R_{Ai} 、 C_0 、 R_H と色差計算に必要な関数データ T 、 E に大別される。分光反射率データは、通常可視域 400～700nm の 20nm 間隔とする。

② N 個の色見本の分光反射率値 $R_s(I)$, $I=1, 2, \dots, N$ および各色見本の色材配合比率 $C_s(I)$, $I=1, 2, \dots, N$ の入力。

③ 以下の色合わせ評価シミュレーション計算のため式 (5-2) による R 値から k/s 値への変換など、データの前処理を行なう。ここで Q_{Ai} 、 Q_s 、 Q_H が定まり、これらの値は以後の経験的因子値の変動の影響を受けない。

④ 調色計算は、ブロック①、②で入力されたデータの一部あるいはすべてを使用する。

⑤ 経験的因子の設定値を組み入れ、所定の調色計算ルーチンに従って、 $R_s(I)$ に対する調色計算を実行。ここで使用する色材は色見本に使用された色材と同一でなければならない。ここで調色処方 C_H が決まる。

⑥ 微係数マトリックス P の各要素は、前記式 (5-11) により定まる。

⑦ 式 (5-11)、(5-12) により調色結果 (処方 C_H で色材混合したもの) の分光反射率 R_H の計算。

⑧ 式 (5-13)、(5-14)、(5-15) により $R_s(I)$ 、 R_H の色差 $\Delta E(I)$ を計算。ブロック⑥、⑦、⑧がシミュレーション計算の主体であるが、このブロック⑥、⑦、⑧の過程では、経験的因子値の変動の影響を受けない。経験的因子値の変動は⑤の調色計算解 C_H にだけ影響を及ぼす。

⑨ N 個の見本を対象に、⑤～⑧の過程を N 回繰り返した後、色見本群色差 $\Delta E(I)$ の平均値などを求める。

⑩ 経験的因子値の初期値から始まって任意ステップ幅に変動し、考察の対象範囲をカバーする。検討対象の経験的因子が n 個あればこのループは n 重となる。

5.3.2 シミュレーション精度の確認実験

以上述べた色合わせシミュレーション計算が、どの程度実際の場合と一致するかを見るため、それぞれ8種類の色見本からなるA群、B群のサンプル群に対し、色合わせ評価シミュレーション計算による予測色差 (ΔE_s) と、実際に色材配合試験を行ない、測色を経て求めた実測色差 (ΔE_c) (CIE 1964色差式による) とを比較して示すと、それぞれ表5-1、表5-2となった。

サンプル群Aは、ウールを下地布とする染色色見本群、サンプル群Bは、テトロンを下地布とする染色色見本群であり、それぞれの色見本の三刺激値（ X 、 Y 、 Z ）、これらの色見本を作成するため配合した色材（染料）濃度の比率（ C_s ）、各色見本に対し調色計算を実行して得られた処方（ C_H ）を表5-1、および表5-2に示した。また各サンプル群に対する色合わせ評価シミュレーション計算の主な条件をそれぞれの表に付記した。表5-2における状態1と状態2は、調色計算により得られた解 C_H の差に基づく。状態1は平均的に色合わせ精度が悪い場合、状態2は平均的に色合わせ精度が良い場合であるが、これは後述のように界面反射補正値を最適値にした場合と、故意に多少ずらした場合の差を見ようとしたものである。

表5-1、表5-2を通じて扱った24個の対象について、実測色差 ΔE_c と、色合せ評価シミュレーション計算にもとづく予測色差 ΔE_s の差 $dE (= |\Delta E_c - \Delta E_s|)$ を累積分布図に示すと図5-2の曲線(a)となる。布のように表面状態が分光測定値に微妙な影響を与える対象物では、一般に測定の再現性は悪く、 ΔE_s と ΔE_c との差 dE の中にも、測定再現性に基因する誤差がかなり含まれる。ここで扱った色見本のうちから任意のもの数種類を抽出し、それぞれ同一物を10回測定した場合に現われた色差値を累積分布図として示すと図5-2曲線(b)となった。

図5-2曲線(b)から見て、ここで扱った色見本群については、測定の再現性からむ色差を0.2～0.5程度考慮する必要がある。またここで考察している対象には測定の再現性のほかに、染色過程での再現性（同一処方で配合試験を行なっても最終的な色に多少の差が現われる現象）をも考慮する必要がある。これらのことを合わせ考えれば図5-2あるいは表5-1、表5-2の結果は、シミュレーション計算による予測色差（ ΔE_s ）と、実際の配合試験を経て得られた実測色差（ ΔE_c ）とが良好に対応していることを示している。

表5-2の状態1と状態2からわかるように、色合わせ精度の推移傾向は、シミュレーション計算結果に明確に現われている。色合わせ評価シミュレーション計算のおもな目的は、個々の色見本における色差値の絶対量を知るよりも、むしろ要因変動に伴う色見本群全体の色合わせ精度の推移を検討することにあるから、以上述べた色合わせ評価シミュレーション計算手法は、実用上十分な精度を持つ。

表5-1 サンプル群Aを対象とした実測結果とシミュレーション計算結果の比較

No.	色見本三刺激値			C_s			C_M			実測色差 ΔE_c	予測色差 ΔE_s
	X	Y	Z	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3		
1	0.3688	0.3814	0.2168	0.16	0.02	0.02	0.161	0.023	0.023	2.450	1.916
2	0.085	0.0831	0.0385	2.40	0.3	0.3	2.154	0.311	0.286	1.184	1.233
3	0.2670	0.2414	0.2276	0.08	0.08	0.04	0.080	0.082	0.043	1.368	1.108
4	0.0985	0.0821	0.0677	0.4	0.4	0.2	0.390	0.435	0.193	2.648	1.764
5	0.0452	0.0382	0.0347	1.2	1.2	0.6	0.800	1.160	0.591	1.074	1.881
6	0.2444	0.2355	0.2285	0.08	0.06	0.06	0.082	0.062	0.061	0.528	0.441
7	0.0872	0.0808	0.0715	0.4	0.3	0.3	0.405	0.322	0.300	0.945	0.978
8	0.0345	0.0323	0.0320	1.2	0.9	0.9	0.905	0.911	0.851	0.960	0.988

基準色材：Yellow系、Red系、Blue系各一種、計3種

基準色材規定濃度： $C_0 = 0.1\%$, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 (各色材共通)

下地布：ウール100%

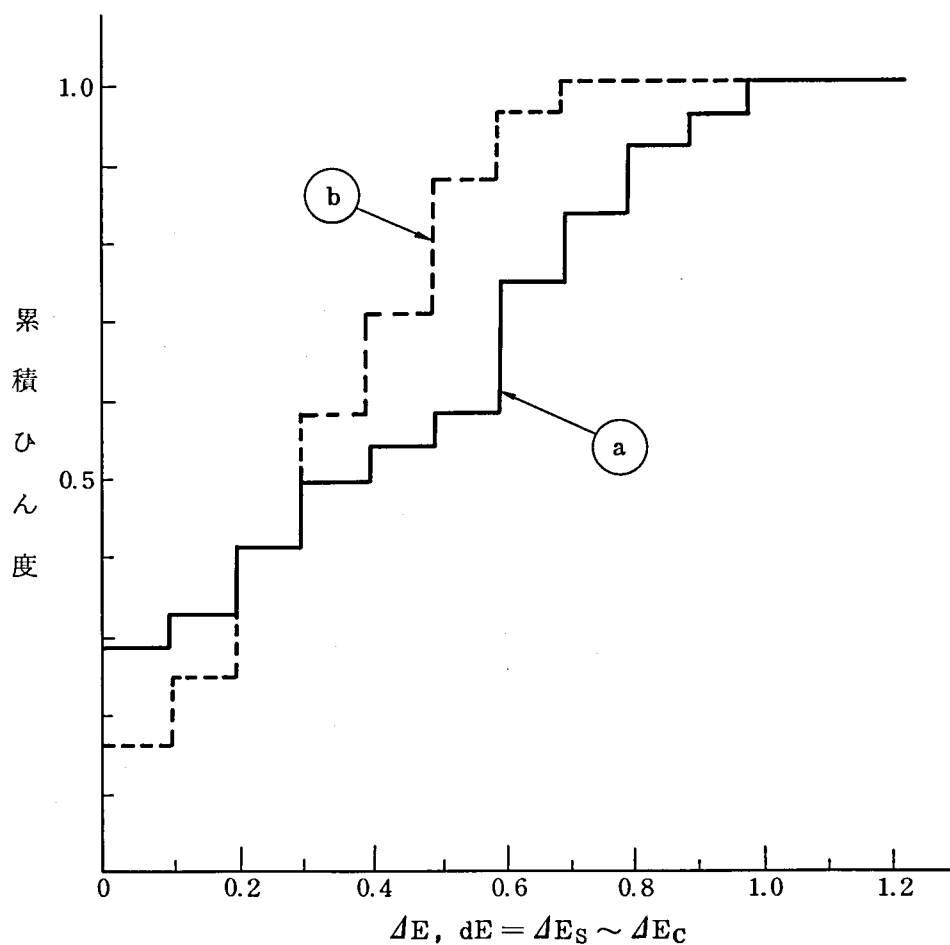


図5-2 実測色差とシミュレーション計算色差の相互差 (dE)
および測定の実現性に伴う色差値の累積ひん度例

表 5-2 サンプル群Bを対象とした実測結果とシミュレーション計算結果の比較

No.	色見本三刺激値			C_S			C_M			実測色差	予測色差
	X	Y	Z	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	ΔE_c	ΔE_s
1	0.0804	0.0907	0.1264	1.0	0.4	0.8	0.929	0.417	0.746	1.136	1.054
2	0.1749	0.1623	0.2215	0.3	0.5	0.2	0.262	0.578	0.199	3.200	2.197
3	0.1749	0.1793	0.2011	0.5	0.3	0.2	0.482	0.330	0.203	1.712	1.257
4	0.2490	0.2434	0.3010	0.2	0.2	0.1	0.191	0.213	0.098	1.612	1.261
5	0.0802	0.0779	0.1119	1.0	1.2	0.8	0.854	1.602	0.806	3.238	2.471
6	0.0811	0.0863	0.0972	1.5	0.8	0.7	1.460	1.033	0.702	3.365	2.481
7	0.171	0.1051	0.1172	1.0	0.8	0.4	0.915	0.971	0.373	3.985	3.414
8	0.1004	0.1061	0.1330	1.0	0.6	0.6	0.920	0.687	0.560	2.623	2.093
<div> <div>状態1</div> <div>↑</div> </div>											
<div> <div>状態2</div> <div>↓</div> </div>											
1	状態1と同じ						0.985	0.377	0.751	0.526	0.854
2							0.278	0.523	0.200	1.517	0.967
3							0.511	0.298	0.204	0.144	0.370
4							0.203	0.193	0.099	0.576	0.553
5							1.010	1.470	0.808	2.265	1.625
6							1.550	0.942	0.704	2.083	1.524
7							0.971	0.879	0.374	2.350	2.159
8							0.976	0.621	0.562	1.128	1.135

基準色材：Yellow系、Pink系、Blue系各一種、計3種

基準色材規定濃度： $C_0 = 0.05\%$ ， 0.1， 0.25， 0.5， 1.0， 2.0， 3.0（各色材共通）

下地布：テترون100%

5. 4 色合わせ評価シミュレーション計算による二、三の問題の解析例

5. 4. 1 補正式の効果の検討

(1) 分光反射率値の界面反射補正の効果

式(5-2)のクベルカムンク式は、着色層と外部との屈折率が同一であることを仮定し、界面反射がないことを条件に成立しているが、実際の測定では大なり小なり界面反射が介在するから、これに対する測定値の補正が望まれる。界面反射補正式については、次の式が良く知られているので⁵⁻⁴⁾、ここではこの式の効果について検討する。

$$R = (R_0 - \rho_1) / ((1 - \rho_1) - \rho_2 (1 - R_0)) \quad \dots (5-17)$$

ただし、 R_0 : 分光反射率測定値 ($0 \leq R_0 \leq 1$)

R : 界面反射を補正した分光反射率 ($0 \leq R \leq 1$)

ρ_1 : 着色層外部からの光に対する界面反射率 (フレンネル反射率)

ρ_2 : 着色層内部からの光に対する界面反射率

サンプル群C, D, E (サンプル群C: ウール100%染色布、色見本9種。サンプル群D: テトロン100%染色布、色見本12種。サンプル群E: ABSプラスチック、色見本9種)を対象にして ρ_1 , ρ_2 を変数とし、色合わせ評価シミュレーション計算を実行した結果が、図5-3である。

最適な界面反射補正值は、使用する測定器および測定条件により異なるが、図5-3に示したサンプルはプリズム・グレーティング方式の分光測定器により、正反射を除く積分球による測定である。図5-3から見てここで使用した測定データに対しては $\rho_1 = 0.0 \sim 0.005$, $\rho_2 = 0.3 \sim 0.5$ が色合わせ精度面で有効といえる。この図から定まる ρ_2 の最適値は、式(5-17)の本来の意味での界面反射補正量を表わしているかどうか疑問である。クベルカムンク式(式(5-2))では、一様な拡散光で対象物を均一に照射することを仮定しているが、実際の測定器ではビーム状の光を照射しているため、周囲に拡散して積分球内に集光されない光が少なからずあると考えられる。この散逸する光は内面の界面反射と類似の効果を生じているため、図5-3のように、 $\rho_2 = 0.4$ の補正が有効になっていると考えられる。いずれにしてもここで使用した測定器から得られるデータに対しては、 $\rho_1 = 0.0 \sim 0.005$, $\rho_2 = 0.4$ の補正が効果的であることが、シミュレーション計算結果(図5-3)から容易にわかる。

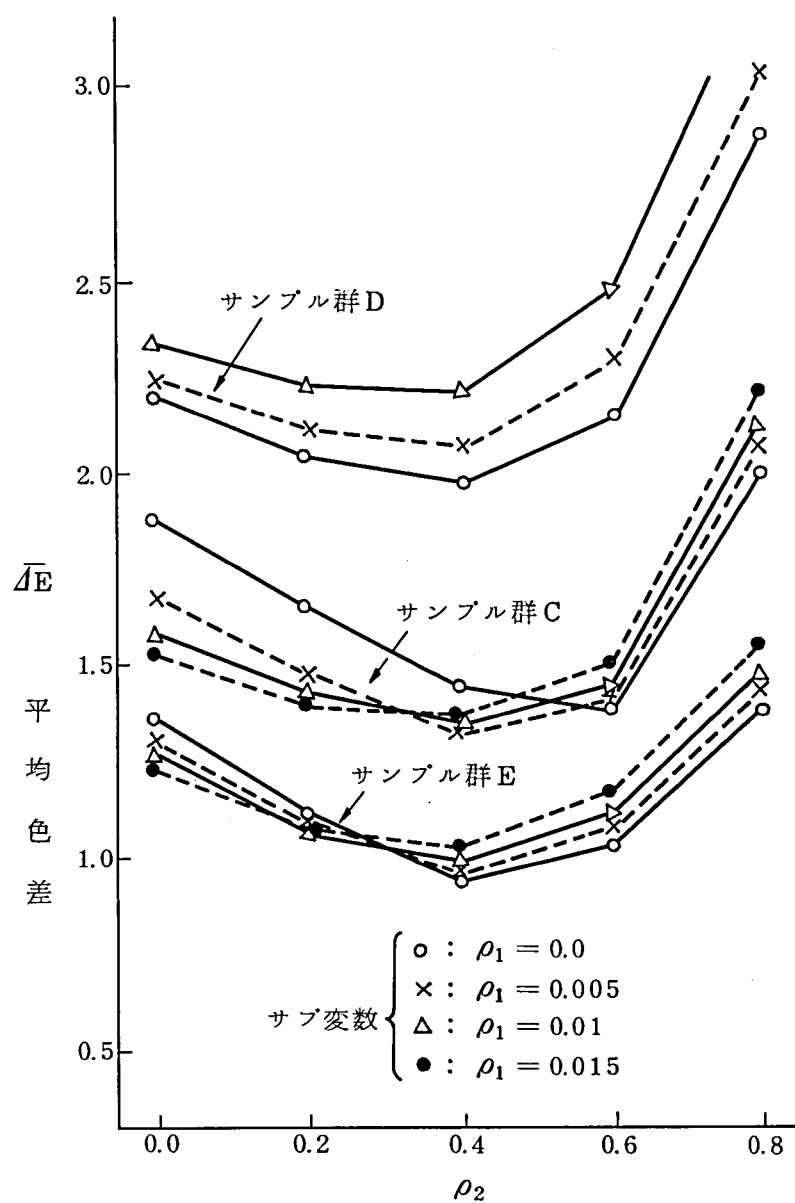


図 5-3 界面反射補正量 (ρ_1 , ρ_2) と色合わせ精度

(2) クベルカムンク式のべき乗補正の効果

クベルカムンク式(式(5-2))をべき乗(1/1.25乗)したほうが色合わせ精度が向上するとの報告⁵⁻⁶⁾がある。したがってこの点を検討するため

$$Q = \{ (1-R)^2 / 2R \}^{1/u} \quad \dots (5-18)$$

として、 $u = 0.8 \sim 1.3$ について2組の色見本群(前記の色見本群C, D)を対象に、色合わせ評価シミュレーション計算を実行した結果、図5-4を得た。

この結果から見て $u = 0.9 \sim 1.05$ 、すなわちクベルカムンク式のそまがむしろ良いといえる。この点については、別の文献⁵⁻⁷⁾においてもまったく別の立場から検討し、 $u = 1.0$ がよいと述べられており、式(5-18)のべき乗補正の効果は期待できないといえよう。ただこの補正方法は、特定の測定器や特定の測定方法については有効かも知れないので、個々のシステムごとに効果を確認する必要性は残っている。

5. 4. 2 色材のk/s 値非直線性に対する対策

調色計算は、通常式(5-2)のクベルカムンク式と式(5-4)の加法性理論を裏付けに行なわれるが、この場合、色材の定数(k/s)の濃度Cに関する直線性を仮定している。しかし大部分の色材について濃度範囲が広いと直線性は十分ではなく、特に高濃度域での直線性が悪くなるから、色材濃度の高い色見本(低い明度の色見本)に対する色合わせ精度の低下が著しい。これに対する対策は、(イ)色材基準定数(k/s)を折線近似で表示する。(ロ)色材の二定数(k, s)を分離して扱う、の2点が考えられ以下個々の場合について検討する。

(1) 基準定数折線近似の効果

折線近似のための濃度軸上でのサンプリング点数を副変数とし、サンプル群F(ウール100%染色布、色見本22種)を対象として、色合わせ評価シミュレーション計算を実行した一例が図5-5である。各曲線の具体的なサンプリング点は図中に示した。また便宜上サンプリング点は3色材(Red系、Yellow系、Blue系)とも同じである。(計算式は付録5-1参照)

図において、曲線aは基準関数($Q_j(C)$)を直線とした場合(濃度軸上でのサンプリング点が一点)の色合わせ精度であり、これに対し曲線b~fは順次サンプリング点数を多くして、折線近似表示した場合の色合わせ精度である。この色合わせ評価シミュレーション計算結果から、基準色材定数の折線近似が平均的な色合わせ精度向上に非常に効果的で

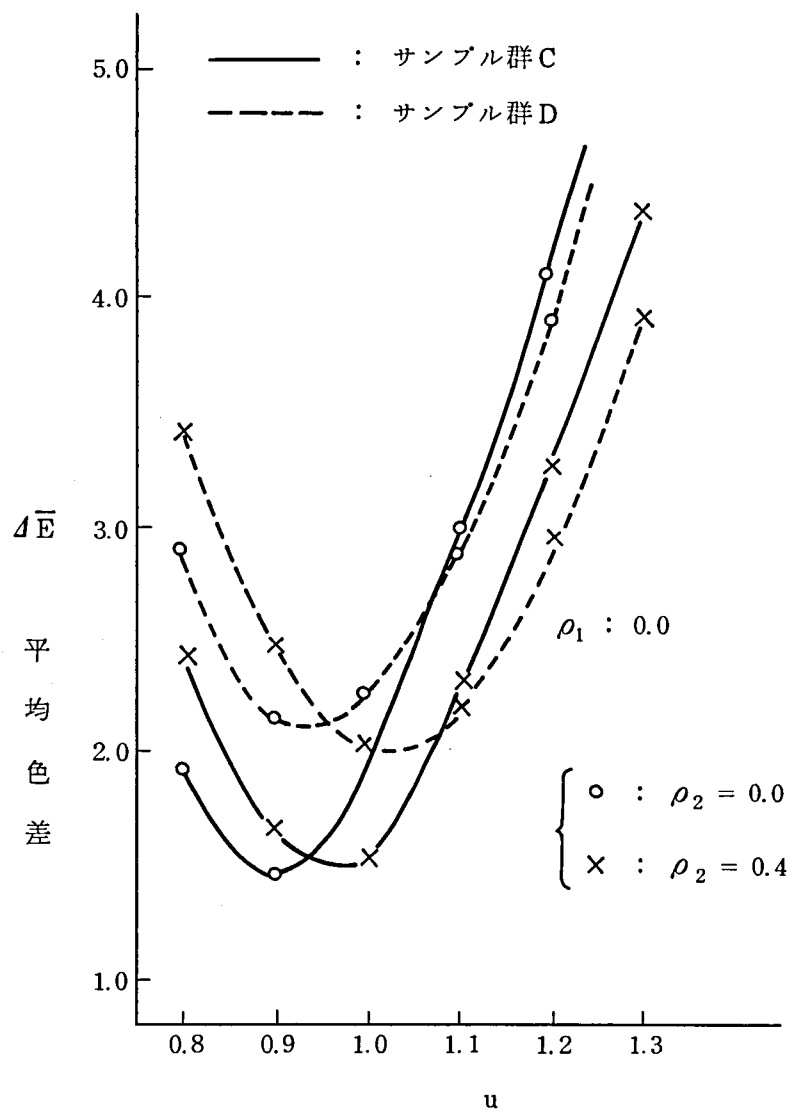


図 5-4 クベルカムンク式をべき乗補正した場合の色合わせ精度推移

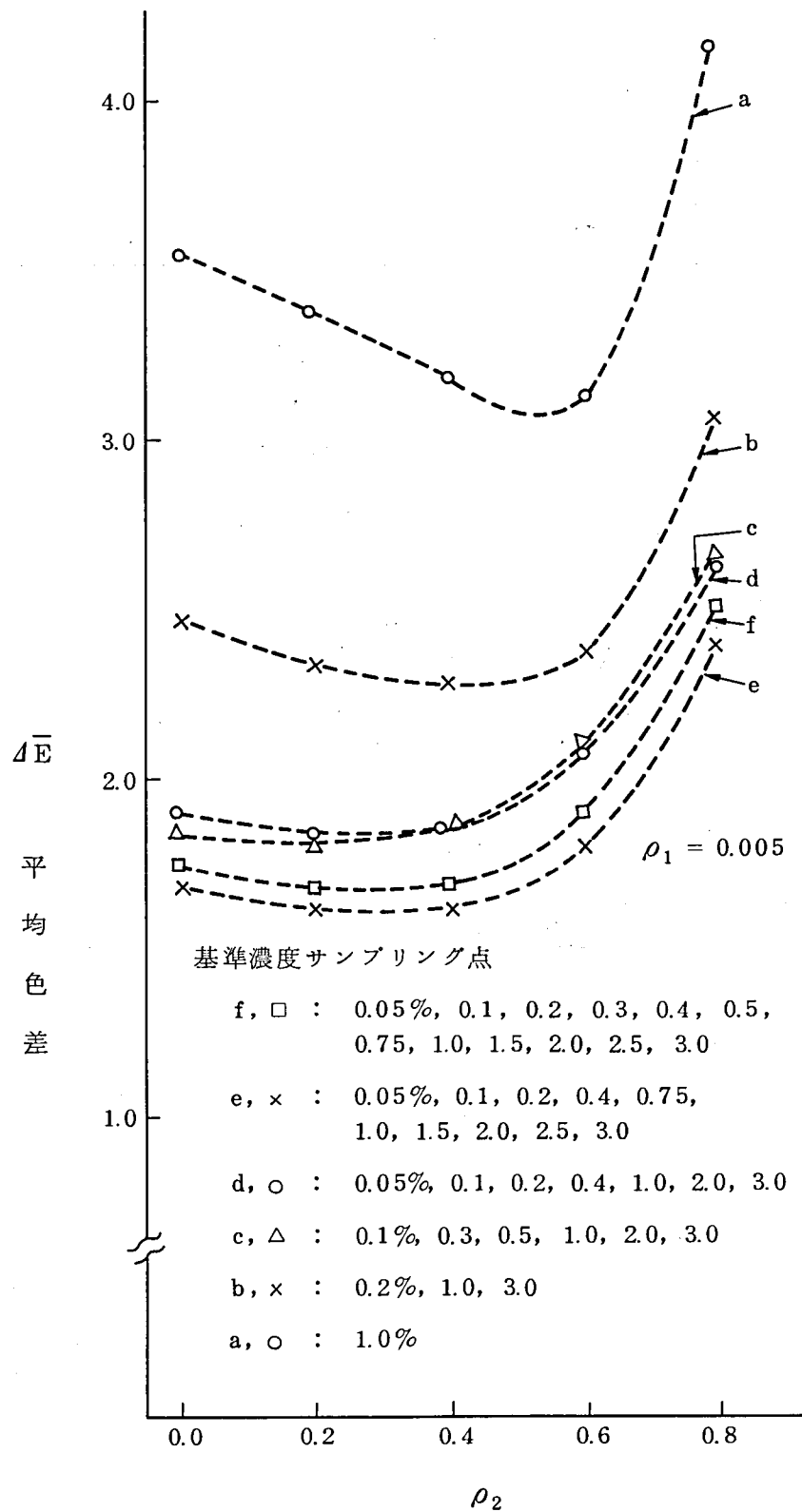


図 5-5 基準色材定数を折線近似した場合の色合わせ精度

あることがわかる。またサンプリング点数をある数以上に多くしても、平均的色合わせ精度の向上があまり期待できないことも、図に良く現われているが、これは色材定数が本来極端に非直線的ではないことを思えば当然の結果である。

調色計算の実用面でも、サンプリング点数が多いことは資料の作成と測定、計算機の記憶容量の増大など不都合な点が多く、全体的な色合わせ精度との兼ね合いで、サンプリング点数はできるだけ少ないほうがよい。図5-5の結果から見て、ここで扱った色材については6点(0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%)のサンプリングで十分といえる。他の種々の色材について検定を行なって見た結果では、非直線性傾向は良く類似していた。二定数理論が適用可能な通常の色材については、実用の濃度範囲を4~6点サンプリングする程度で十分と考えられる。

(2) 色材の二定数(k, s) を分離して扱う効果

色材のk/s 値に着目する調色計算では、式(5-4)でも示したように白色色材、あるいは白色下地のS_wに対し、他の色材のSが無視できるほどに小さいと仮定している。すなわち、

$$\begin{aligned} Q_i(C) &= (K_w + K_i C) / (S_w + S_i C) \\ &\approx (K_i / S_w) C = (k/s)_i \cdot C \end{aligned} \quad \dots (5-19)$$

ただし、 $Q_i(C)$: i 番目基準色材のk/s 値、式(5-4)における $G_i(\lambda, C_i)$ に相当する。

K_w, S_w : 白色下地あるいは白色色材のk, s 値

K_i, S_i : i 番目基準色材の吸収係数、散乱係数

として各色材の S_i および K_w を無視したが、このことが色材基準定数の非直線性誤差の一因となっている。 K_i, S_i を分離決定し、調色方程式(式(5-4))中の S_i を無視しなければ、精度向上が期待される(ただし K_i, S_i 自身の非直線性は保証されない)。定数 K_i, S_i は以下のように求まる。

濃度Cの色材について式(5-19)にも示したように、次の関係が成立する。

$$Q_i(C) = (K_w + C \cdot K_i) / (S_w + C \cdot S_i) \quad \dots (5-20)$$

ただし、記号の意味は式(5-19)の場合と同じ

K_i, S_i の絶対値を知る必要がないので、 S_w を基準とし $S_w = 1.0$ とすれば、二つの濃度 C_1, C_2 に対して

$$Q_{i1} = (Q_w + C_1 \cdot K_i) / (1.0 + C_1 \cdot S_i) \quad \dots (5-21)$$

$$Q_{i2} = (Q_w + C_2 \cdot K_i) / (1.0 + C_2 \cdot S_i) \quad \dots (5-22)$$

ただし、 $Q_w = K_w / S_w = K_w$

式(5-21)、(5-22)より任意の色材の二定数 K_i 、 S_i は

$$S_i = \frac{(Q_w - Q_{i2}) / C_2 - (Q_w - Q_{i1}) / C_1}{Q_{i2} - Q_{i1}} \quad \dots (5-23)$$

$$K_i = \frac{Q_{i1} (Q_w - Q_{i2}) / C_2 - Q_{i2} (Q_w - Q_{i1}) / C_1}{Q_{i2} - Q_{i1}} \quad \dots (5-24)$$

として定まる。このとき q 個の色材を混合した場合の関係式は、次のように表わされる。

$$Q_m^{\lambda_j} = \left(\frac{C_1 K_1 + C_2 K_2 + \dots C_q K_q + K_w}{C_1 S_1 + C_2 S_2 + \dots C_q S_q + S_w} \right) \lambda_j \quad \dots (5-25)$$

ただし、 $Q_m^{\lambda_j} = (k/s)_m^{\lambda_j}$ ： q 個の色材を混合したときの波長 λ_j における k/s 値

以上、式(5-23)、(5-24)、(5-25)に基づいて二定数、 K_i 、 S_i を分離した調色計算が可能になる(計算式は付録5-2参照)。

前述のサンプル群C、サンプル群Dを対象としてそれぞれ、(a) 基準色材定数 k/s を直線表示して調色計算を行なった場合、(b) 定数 k/s 値を6点折線近似で表示して調色計算を行なった場合、(c) 色材定数 k, s を分離し、それぞれ直線表示して扱い、調色計算を行なった場合について、色合わせ評価シミュレーション計算を実行した結果が、図5-6 (I)、(II)である。

サンプル群CとDとで結果に差があるが、定数 k, s を分離して扱う方法の効果は図に明確に現われており、特にサンプル群Dの場合には大幅に色合わせ精度が向上していて、6点折線近似の場合と大差の無い結果が得られていることがわかる。

基準定数を6点で折線近似するためには6濃度点での基準データを必要とするのに対し、定数 k, s 分離法では2濃度点での基準データで良く、このことは基準データの作成の労力や、計算機の必要記憶容量などの面で好都合であるから、色合わせ精度との兼ね合いで二定数 k, s を分離して扱う方法も、十分実用価値があると考えられる。ただこの方法の効果

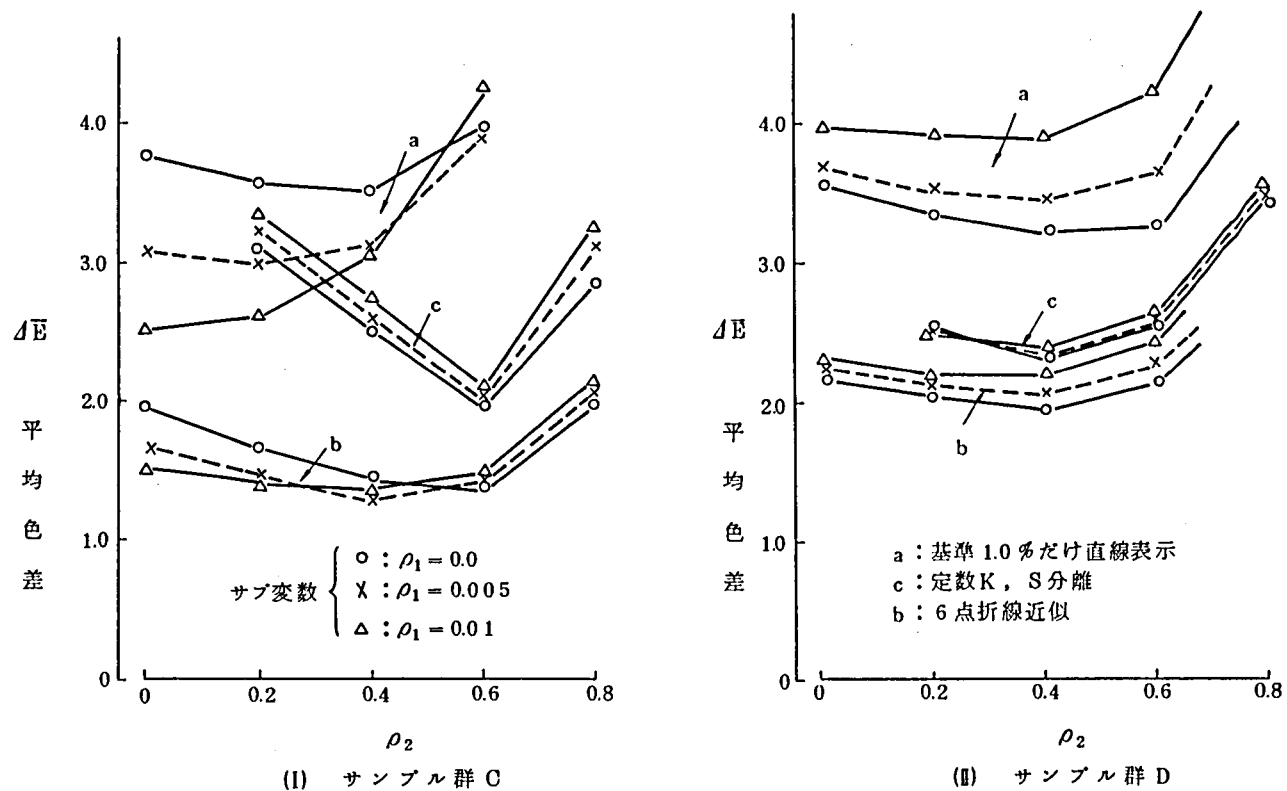


図 5-6 基準色材定数の取扱い方に伴う色合わせ精度推移

の大小は、個々の色材が式(5-19)の近似をどの程度満たすか否かにかかっているから、個々の色材ごとにシミュレーション計算を通じて効果を確認することが望まれる。

5. 5. まとめ

本章では、デジタル計算機を使用して、色合わせ精度評価過程をシミュレーションする手法を示した。この手法を使用すれば調色計算にかかわる基礎的な問題を迅速に解析することができる。ここではその具体的方法と応用解析例について述べた。内容を要約すると、

(1) 色材の配合比率が既知である色見本群を対象として考える場合、調色計算の解の精度の評価過程 — すなわち、調色計算により得られた処方で色材の配合試験を行なった結果と、もとの色見本との色合わせ精度の評価過程 — は数式モデル化される。したがってこの過程を計算機でシミュレーションすることが可能であり、色材の試験配合と測色、あるいは試験配合と視感判定の手続きなしに種々の経験的にさだまる因子の解析が可能である。

(2) 特定の因子の最適値については、個々のシステムあるいは、個々の色材ごとにシミュレーションを実施しなければならない面が多いが、比較的一般性のある問題として、

(a) 界面反射補正など補正式の効果の検討、(b) 色材基準定数の非直線性に対する対策と効果の検討、に関してシミュレーション手法を適用して解析を試み、界面反射補正の効果と、色材基準定数を折線で近似することの効果を確認した。

色合わせ評価過程を計算機でシミュレーションする方法を開発することにより、調色計算にかかわる種々の要因の解明が可能になり、高性能な調色計算装置の設計が容易に行なえるようになった。

付 録

付録5-1 色材基準定数(K/S)を折線近似で表わした場合の調色計算式。

折線近似のため濃度軸上を $C_{01}\%$ 、 $C_{02}\%$ 、… $C_{0K}\%$ でサンプリングする(便宜上全色材について共通とする)。このとき次のベクトル C_0 を定める。

$$C_0 = \begin{pmatrix} C_{01} \\ \vdots \\ C_{0k} \end{pmatrix} \quad : \text{基準色材の規定濃度ベクトル}$$

$$C_{01} = 0$$

波長軸上でのサンプリングは可視域を等間隔に n 点サンプリングする。調色計算に必要な一連の分光反射率データを R_W 、 R_{Ai} 、 R_S として次のように表わす。

$$R_W = \begin{pmatrix} RW_1 \\ \vdots \\ RW_n \end{pmatrix} \quad : \text{無着色下地あるいは白色色材の分光反射率ベクトル}$$

$$R_{Ai} = \begin{pmatrix} a_{11}^i & \cdots & a_{1k}^i \\ \vdots & a_{jj}^i & \vdots \\ a_{n1}^i & \cdots & a_{nk}^i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} i \text{ 番目色材の規定濃度 } (C_0) \text{ での分光} \\ \text{反射率マトリックス} \\ : i = 1 \sim q, \quad a_{j1}^i = RW_j \\ q \text{ は色材の数} \end{array}$$

$$R_S = \begin{pmatrix} RS_1 \\ \vdots \\ RS_n \end{pmatrix} \quad : \text{調色計算の色合わせ見本の分光反射率ベクトル}$$

R_W 、 R_{Ai} 、 R_S の各要素に対しクベルカ・ムンク式の変換（本文(5-2) 式）を加え、それぞれ Q_W 、 Q_{Ai} 、 Q_S を得る。すなわち

$$Q_W = \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix}, \quad Q_S = \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}, \quad Q_{Ai} = \begin{pmatrix} A_{11}^i & \cdots & A_{1k}^i \\ \vdots & A_{jj}^i & \vdots \\ A_{n1}^i & \cdots & A_{nk}^i \end{pmatrix}$$

色合わせ見本 R_S に対する調色計算解を C_H とし、 C_H の各要素が次の関係を満たすとする。

$$C_H = \begin{pmatrix} C_{H1} \\ \vdots \\ C_{Hq} \end{pmatrix}, \quad C_{0ji} \leq C_{Hi} < C_{0ji+1} \quad \cdots \text{付(1)}$$

このとき分光分布一致方式による調色計算方程式は次のように表わされる。

$$P \cdot (C_H - C_B) + Q_B + Q_W = Q_S \quad \cdots \text{付(2)}$$

ただし

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1q} \\ \vdots & P_{jj} & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nq} \end{pmatrix}, P_{li} = (A^i_{lji+1} - A^i_{lji}) / (C_{0ji+1} - C_{0ji})$$

$$C_B = \begin{pmatrix} C_{B1} \\ \vdots \\ C_{Bq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{0j1} \\ \vdots \\ C_{0jq} \end{pmatrix}, Q_B = \begin{pmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \sum_{i=1}^q A^i_{1ji} - W_1, \cdots B_n = \sum_{i=1}^q A^i_{nji} - W_n$$

付(2) 式は方程式数 n 、未知数 q の連立一次方程式であって、通常 $n > q$ であるからこのままでは解が定まらないが、最小自乗近似で正規方程式を求めると次のようになる。

$$(G \cdot P)^t (G \cdot P) (C_H - C_B) = (G \cdot P)^t (G (Q_S - Q_B - Q_W)) \quad \cdots \text{付(3)}$$

ただし t : 転置行列

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & g_{jj} & \vdots \\ 0 & \cdots & g_{nn} \end{pmatrix} \quad : \text{重み関数、たとえば } g_{jj} = x_j + y_j + z_j \text{ など}$$

したがって求める解 C_H は

$$C_H = C_B + \{(G \cdot P)^t (G \cdot P)\}^{-1} (G \cdot P)^t \{G (Q_S - Q_B - Q_W)\} \quad \cdots \text{付(4)}$$

以上の式の具体的な解法は、まず初期値として

$$J = \begin{pmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

の状態すなわち $C_B = 0$, $Q_B = 0$ (0 :ゼロベクトル) で解 C_H^1 を求める。このとき C_H^1 の要素の内、付(1) 式の関係を満たさないものがあれば、対応する J の要素を単位量 (+1) 増加し、 C_B , Q_B を変更し新たに解 C_H^2 を求め、以下順次同様の手順により付(1) 式の関係がすべて満たされるまで計算を繰り返す。

付録5-2 色材の二定数 (K , S) を分離して扱う場合の調色計算式。

ここでは定数 K , S が個別に既知であるので q 個の色材を混合した場合の加法性理論に基づく式は次のように表わされる。

$$Q_m^{\lambda j} = \left(\frac{C_1 K_1 + C_2 K_2 + \dots + C_q K_q + K_W}{C_1 S_1 + C_2 S_2 + \dots + C_q S_q + S_W} \right) \lambda j \quad \dots \text{付(11)}$$

ただし $Q_m^{\lambda j} = (K/S)_m^{\lambda j}$: q 個の色材を混合したときの K/S 値

K_i, S_i : i 番目色材の K, S 値

K_W, S_W : 下地あるいは白色色材の K, S 値

付(11)式の関係は全波長について成立する。したがって波長軸を n 点サンプリングした場合の関係は次のようになる。

$$(Q_m \cdot S_W - K_W) = (A_K - Q_m \cdot A_S) \cdot C_H \quad \dots \text{付(12)}$$

ただし

$$Q_m = \begin{bmatrix} Q_m^1 & \dots & 0 \\ \vdots & Q_m^j & \vdots \\ 0 & \dots & Q_m^n \end{bmatrix}, \quad S_W = \begin{bmatrix} S_W^1 \\ \vdots \\ S_W^n \end{bmatrix}, \quad K_W = \begin{bmatrix} K_W^1 \\ \vdots \\ K_W^n \end{bmatrix}$$

$$C_H = \begin{bmatrix} C_{H1} \\ \vdots \\ C_{Hq} \end{bmatrix}$$

$$A_K = \begin{bmatrix} K_1^1 & \dots & K_q^1 \\ \vdots & K_i^j & \vdots \\ K_1^n & \dots & K_q^n \end{bmatrix}, \quad A_S = \begin{bmatrix} S_1^1 & \dots & S_q^1 \\ \vdots & S_i^j & \vdots \\ S_1^n & \dots & S_q^n \end{bmatrix}$$

付(12)式に対し最小自乗近似で正規方程式を求めると

$$(G \cdot B)^t (G \cdot B) C_H = (G \cdot B)^t G (Q_m \cdot S_w - K_w) \quad \dots \text{付(13)}$$

ただし $B = A_K - Q_m \cdot A_S$

G : 重み関数、付(3) 式の場合と同様

したがって解は

$$C_H = \{(G \cdot B)^t (G \cdot B)\}^{-1} (G \cdot B)^t G (Q_m \cdot S_w - K_w) \quad \dots \text{付(14)}$$

第六章 調色計算装置^{6-6)~6-10)}

6. 1 はじめに

工業製品が多品種少量生産の傾向をつよめ、色彩が副次的なものでなく製品価値を左右する重要な存在になって来た。調色に対する要求が量的にも質的にも増大するにつれ、調色自動化の重要性が年々高まっている。前章では調色計算にかかわる基礎的な問題を検討する手段として、計算機による色合せ評価シミュレーション手法を明らかにしたが、調色自動化のためには調色現場で使用できる装置が必要である。1960年代にはアナログ計算式の調色計算装置が開発され、その後学習機構を持つ調色計算装置へと発展したが、アナログ計算式の装置では定数の設定や解を求める操作が人手によるため、自動化効果を十分に得ることができなかった。1970年代に入ってからデジタル計算式の装置が中心になって来た。この場合、分光光度計や計算機などの装置を使用する必要があるが、実際に使用されている装置の大部分は既存の理科学測定用の分光光度計と小型計算機を組み合わせたものであり、操作性や処理速度など必ずしも十分なものではない。また適用できる対象も限られ、たとえば混紡布の調色には適用できないなど、ソフトウェア面から見ても種々の問題が残されている。

そこで、このような問題を解決する新しい調色計算装置を開発した。まず前章で述べた色合せ評価シミュレーション手法を活用し、調色計算にかかわる種々のパラメータの最適化をはかり、色合せ精度の良い調色計算プログラムを実現した。さらに装置面では、測色時間が短かく自動校正機能を持つ調色計算むきの分光光度計や、色材の選択や調色計算指示が容易にできる操作盤の開発などにより、調色処理現場に適した調色計算装置（CMS-100型）を完成した。本装置を染色分野に導入し、その有効性を確認するとともに、染色分野では非常に困難とされていた混紡布の調色計算についても調色計算アルゴリズムを開発しその有効性を示した。本章では調色計算装置CMS-100型を例に取り調色計算装置の構成方法を明らかにする。

6. 2 調色計算の理論と計算プログラムの構成

6. 2. 1 基礎理論

色合せ見本や基準色材サンプルなどの色彩情報は可視波長域における分光反射率で得られる。他方、調色計算の解は使用する色材の濃度値で示す必要がある。したがって調色計算のためには分光反射率値と色材濃度値とを関係づける式が必要となる。CMS-100型では次の三式を基本的な関係式とする二定数理論を適用した。

1) クベルカ・ムンク式^{5-1), 5-2)}

$$K/S = (1 - R_{\infty})^2 / 2R_{\infty} \quad (=Q) \quad \dots (6-1)$$

ただし、 K, S : 対象物体の光の吸収係数および散乱係数

Q : 吸収係数と散乱係数の比 (K/S 値)

R_{∞} : 対象物体の固有反射率

本章では K/S 値を Q 値と呼ぶ。

2) 界面反射補正式⁵⁻⁴⁾

$$R = (R_0 - \rho_1) / [(1 - \rho_1) - \rho_2 (1 - R_0)] \quad \dots (6-2)$$

ただし、 ρ_1 : 対象物体の表面反射率

ρ_2 : 対象物体内面の界面反射率

R_0 : 対象物体の分光反射率実測値

3) 加法性理論⁵⁻³⁾

$$\begin{aligned} Q_m &= (\sum_{i=1}^q C_i \cdot K_i + K_w) / (\sum_{i=1}^q C_i \cdot S_i + S_w) \\ &\doteq \sum_{i=1}^q C_i (K_i / S_w) + K_w / S_w \\ &= \sum_{i=1}^q (C_i / C_0) \cdot Q_i + Q_w, \quad \dots (6-3) \end{aligned}$$

ただし、 Q_m : q 種の色材を混合した時の K/S 値

K_w, S_w : 白色下地の K, S 値

K_i, S_i : i 番目色材の K, S 値

C_i : i 番目色材の濃度, q : 混合される色材の数

Q_i : 白色下地に濃度 C_0 [%] の i 番目色材を加えた時の K/S 値

Q_w : 白色下地の K/S 値

以上の三式は任意の波長点 (λ_j , j : 波長サンプリング点) で成立する関係式である。式 (6-3) で Q_i 値は色材濃度 C_i に対して線形であると仮定しているが、多くの場合必ずしもこの仮定は成立しない。図 6-1 に代表的な色材 (布と染料) について $Q_i (C)$ の値を示す。図 6-1 (A) は羊毛を白色下地とする染料、(B) はテトロンを白色下地とする染料の場合の数波長点における Q 値を表わす。この例からも明らかなように色材濃度が高くなり Q 値が大きくなる領域では直線性はかなり悪くなる。 $Q_i (C)$ 値の濃度 C に対する非直線誤差の影響を除去し、高い等色精度を得るため、CMS-100型では最大 6 濃度点までの基準色材データを計算機内に持ち、 $Q_i (C)$ 値を折線近似することにより調色計算を行う方式を取った。折線近似による等色精度向上の効果は第五章で示した。

式 (6-2) における界面補正係数は測定対象物の種類や使用する測定器の種類により微妙に異なる。第五章で述べた色合せ評価シミュレーション・プログラムを使用して界面補正係数 ρ_1 , ρ_2 の最適値を容易に決定することができる。

6. 2. 2 調色計算方程式

調色計算は分光反射率の一致 (あるいは近似) を考える分光分布一致方式と三刺激値の一致 (あるいは近似) を考える三刺激値一致方式の二方式が考えられ、CMS-100型ではどちらの方式も実行できるようにした。

A) 分光分布一致方式

基準色材定数 $Q_i (C)$ が折線で近似表現される時、分光分布一致方式の等色方程式は次式で示される。

$$A \cdot \Delta C + Q_b = Q_s,$$

$$C_H = C_b + \Delta C, \quad \dots (6-4)$$

ただし、

$$Q_s = \begin{bmatrix} Q_{s1} \\ \vdots \\ Q_{sn} \end{bmatrix} : \text{色合せ見本の } K/S \text{ 値, } n : \text{波長軸サンプリング点数}$$

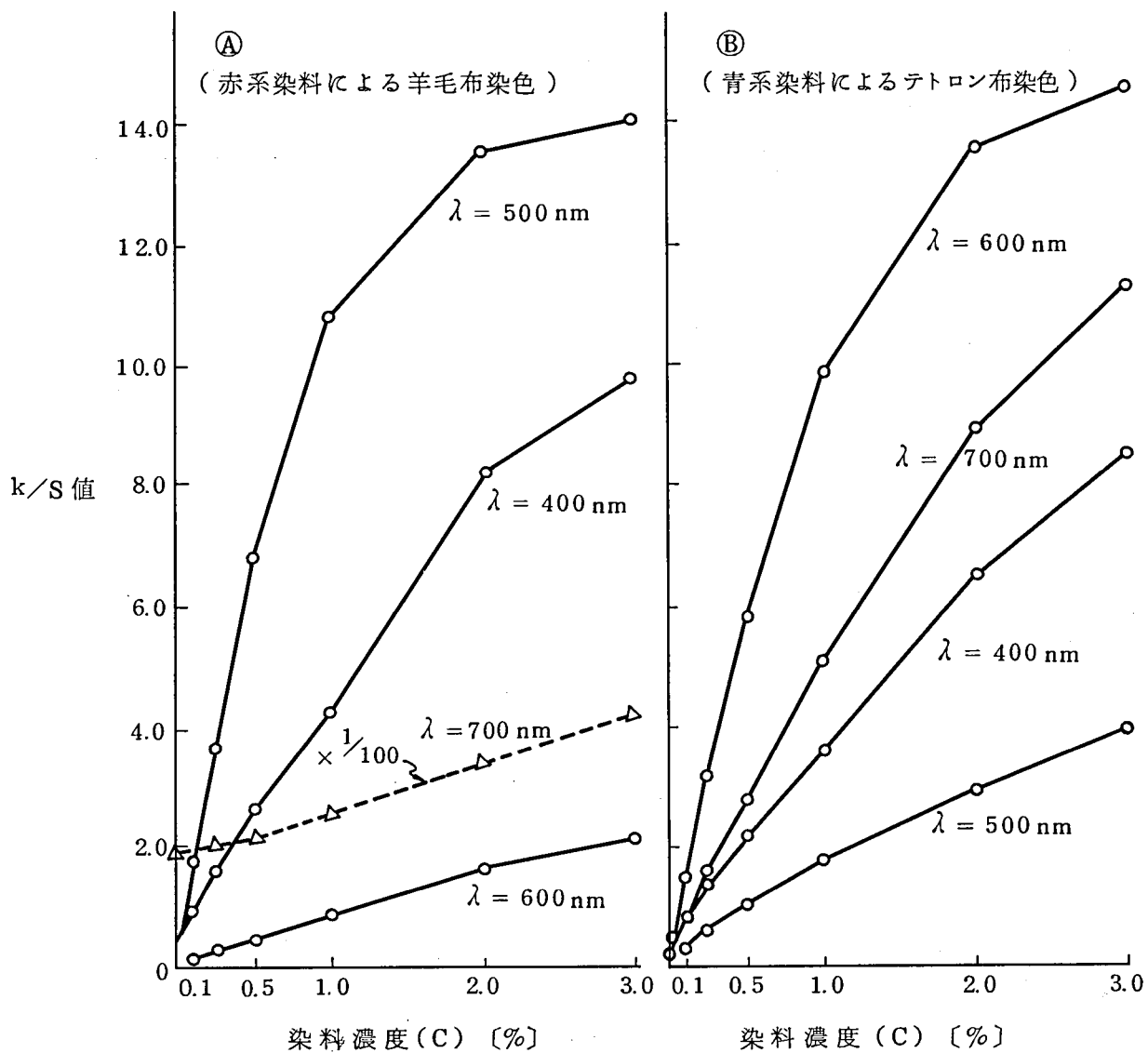


図 6 - 1 染料濃度を変えた場合の k/S 値の例

$$Q_b = \begin{pmatrix} Q_{b1} \\ \vdots \\ Q_{bn} \end{pmatrix} : \text{濃度 } C_b \text{ の色材が下地に付加された時の } K/S \text{ 値}$$

$$C_H = \begin{pmatrix} C_{H1} \\ \vdots \\ C_{Hq} \end{pmatrix} : \text{等色を得るための処方, } q : \text{混合される色材の数}$$

また ΔC , C_b , A はそれぞれ次のようなベクトルおよびマトリックスで示される値である。

$$\Delta C = \begin{pmatrix} \Delta C_1 \\ \vdots \\ \Delta C_q \end{pmatrix}, \quad C_b = \begin{pmatrix} C_{b1} \\ \vdots \\ C_{bq} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1q} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nq} \end{pmatrix}, \quad a = dQ(c)/dc : \text{基準色材の微係数マトリックス}$$

式(6-4)において分光反射率の波長軸でのサンプリング点数 n と、色材の混合数 q は一般に異なる。(CMS-100型では $n=16$, $q=4$ である)したがって最小自乗法⁶⁻³⁾を適用して式(6-4)の解を求める。最小自乗法を適用した時、式(6-4)の ΔC は次式のように求まる。

$$\Delta C = \{(G \cdot A)^t (G \cdot A)\}^{-1} (G \cdot A) G (Q_s - Q_b), \quad \cdots (6-5)$$

ただし

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 \cdots 0 & g_{jj} & 0 \cdots 0 \\ 0 & \cdots & 0 & g_{nn} \end{pmatrix} : \text{最小自乗の重み関数}$$

重み関数 G は完全な分光反射率の一致が得られない場合に有効である。分光反射率曲線のずれが極力視感的な差にならないように重み関数の値を次のように設定した。

$$g_{jj} = \bar{x}_j + \bar{y}_j + \bar{z}_j \quad \cdots (6-6)$$

ただし、 \bar{x}_j , \bar{y}_j , \bar{z}_j : CIE スペクトル三刺激値

B) 三刺激値一致方式⁵⁻⁵⁾

三刺激値一致方式では色合せ見本の三刺激値 (X_s, Y_s, Z_s) と色材混合結果の三刺激値とを一致させる。Q値と分光反射率値とは式(6-1)のように非線形な関係であるから、三刺激値一致解は逐次近似方式で求める。色見本に対して第一近似処方を得る方程式は次式で示される。

$$T \cdot E \cdot D (A \cdot C_1 + Q_w) = T \cdot E \cdot D \cdot Q_s \quad \dots (6-7)$$

ただし

$$T = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \dots & \bar{x}_n \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 & \dots & \bar{y}_n \\ \bar{z}_1 & \bar{z}_2 & \dots & \bar{z}_n \end{pmatrix} : \text{CIEスペクトル三刺激値}$$

$$E = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 \dots 0 & E_j & 0 \dots 0 \\ 0 & \dots & 0 & E_n \end{pmatrix} : \text{照明光源の分光放射強度} \\ \text{(標準の光AまたはC)}$$

$$D = \begin{pmatrix} D_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 \dots 0 & D_j & 0 \dots 0 \\ 0 & \dots & 0 & D_n \end{pmatrix}, \quad D_j = (dR/dQ)_j$$

$$Q_w = \begin{pmatrix} Q_{w1} \\ \vdots \\ Q_{wn} \end{pmatrix} : \text{白色下地のK/S値}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{pmatrix} : \text{第一近似処方}$$

Q_s, A は式(6-4)の場合と同じである。第一近似解は

$$C_1 = (T \cdot E \cdot D \cdot A)^{-1} T \cdot E \cdot D (Q_s - Q_w) \quad \dots (6-8)$$

で得られる。式(6-7)は線形近似を行っているため、第一近似解にはかなりの誤差が含まれる。修正値を求める方程式および修正値は次式で示される。

$$T \cdot E \cdot D \cdot A \cdot \Delta C_1 = \Delta X \quad \dots (6-9)$$

$$\Delta C_1 = (T \cdot E \cdot D \cdot A)^{-1} \Delta X \quad \dots (6-10)$$

ただし

$$\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = X_s - X_1$$

X_s : 色見本の三刺激値

X_1 : 第一近似処方で得られる色の三刺激値

$$\Delta C_1 = \begin{pmatrix} \Delta C_{11} \\ \Delta C_{12} \\ \Delta C_{13} \end{pmatrix} : \text{第一近似解に対する修正値}$$

式(6-9)、(6-10)による修正計算をくり返し、 ΔX が許容偏差内に入った時に計算を終了する。この時最終解は

$$C_H = C_k = C_{k-1} + \Delta C_{k-1} \quad \dots (6-11)$$

で得られる。

6. 2. 3 調色計算プログラムの構成

上記の二つの方式を別々に計算機プログラムにすることは可能であるが、二方式を組み合わせたプログラムが使用上便利であり、条件等色(メタメリズム)の点でも有利である。すなわち通常は分光分布一致方式で解を求めるが、その結果色差が大である場合には標準の光Cのもと(あるいはAのもと)での色差が零となるように三刺激値一致方式により修正計算を行う。この計算機プログラムの概略フロー図は図6-2となる。この計算プログラムでは色差の許容偏差 dE_0 を適当に設定することにより、三刺激値一致解でも分光分布一致解でも必要な方を得ることができる。一般に三刺激値一致方式の計算では、混合色材数が三種に制限されるが、ここに示した計算プログラムでは三種以上の色材混合についても三刺激値一致解を容易に得ることができる。

実用的な調色のためには調色計算装置に次の三種の機能を持たせる必要がある。

- 1) 第一処方計算機能：色見本に対し新規に色合せ処方を計算する。
- 2) 修正処方計算機能：色見本に対し近似色を得る処方がすでにわかっている場合、より正確な色合わせを行うための処方修正計算を行う。
- 3) 最適色材選択機能：目的の色合わせを行うための、色材の最適組み合わせを決定する。

これら三つの機能は2-2項に述べた計算式および図6-2に示した基本的な調色計算

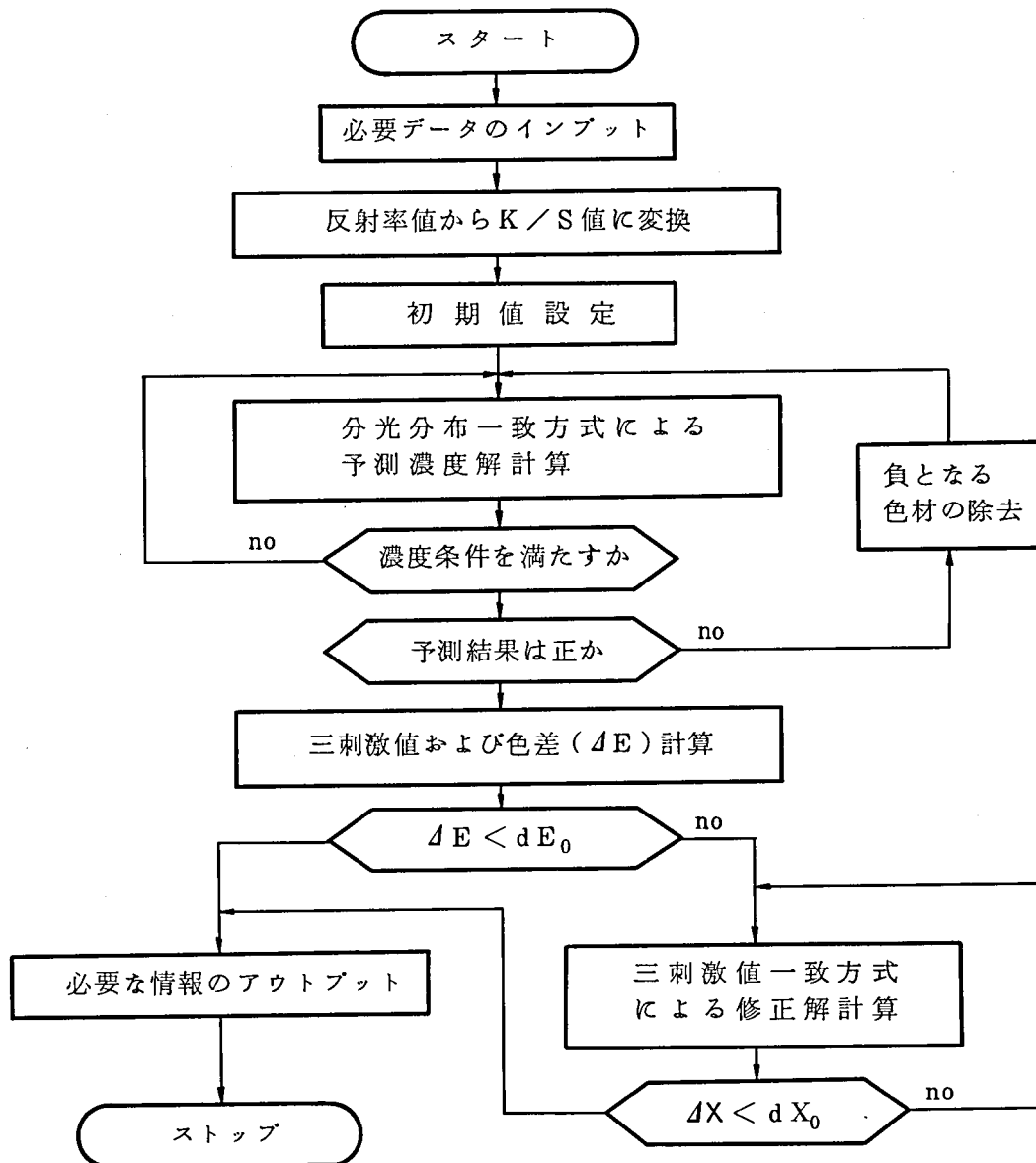


図 6 - 2 調色計算の基本フロー図

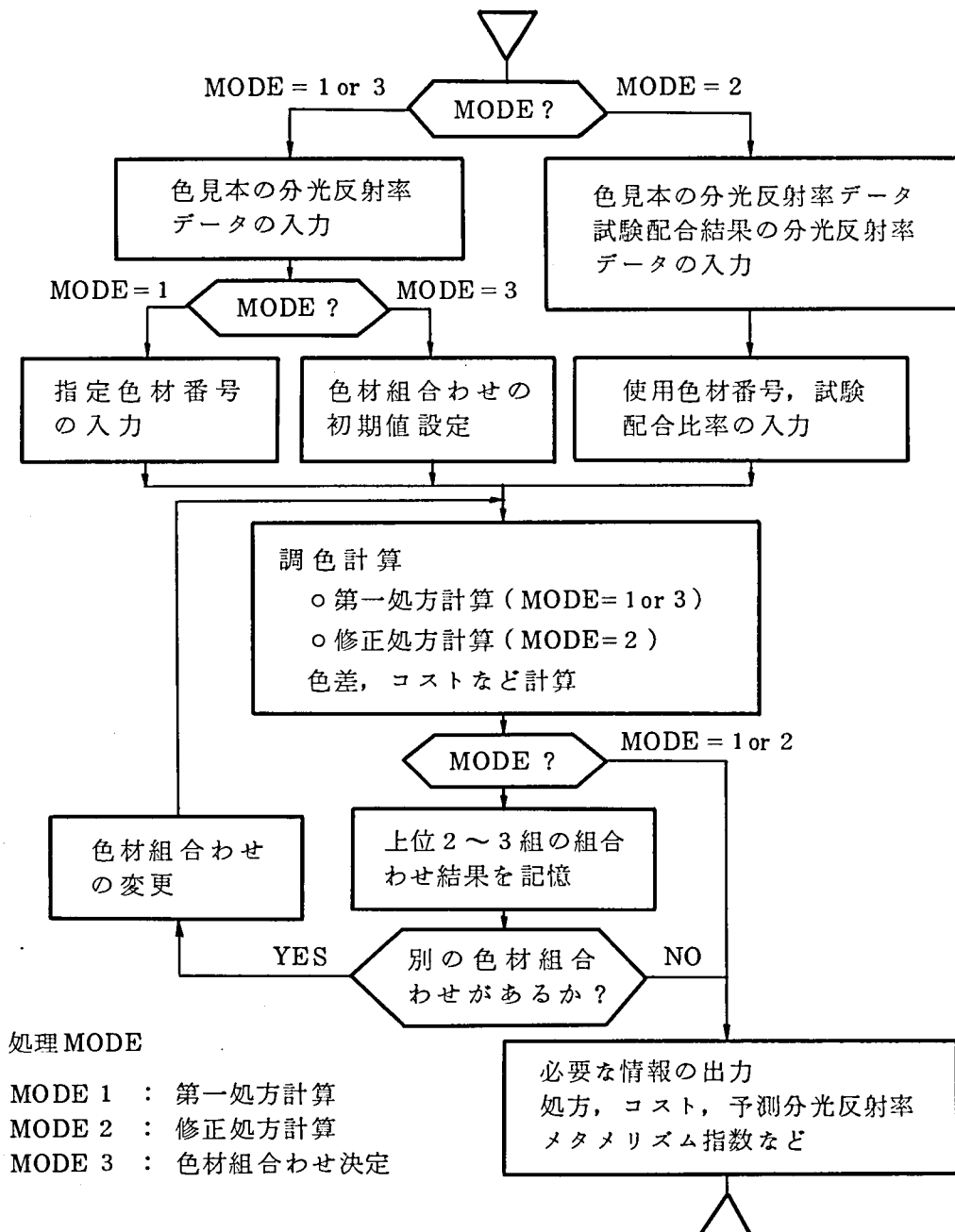


図 6 - 3 処理機能を拡張した調色計算のフロー図

プログラムの組み合わせで実現することができる。色材の最適組み合わせ決定は、多数の色材組み合わせについて調色計算（第一処方計算）を行い、それぞれについて色差値あるいは色材価格などを計算して最も良い組み合わせを決定する。三つの機能を持たせた調色計算処理プログラムのフロー図は図6-3となる。

6.3 調色計算用分光光度計の検討

染料・顔料などによる物体色の色情報抽出は通常20nm間隔のサンプリングデータで十分であり、調色計算も20nm間隔のサンプリングデータで実行する。このような比較的荒いサンプリングデータについてはプリズム式あるいはプリズム・グレーティング式の分光光度計に限らず、干渉フィルタを使用した簡易型の分光光度計も使用可能ではないかと考えられる。またフォトダイオード一次元配列を応用する高速分光光度計が調色計算装置に使用できれば調色自動化の効果がさらに高まる。したがって下記の四種の分光光度計を対象にし、それぞれの分光光度計で得られるデータをもとに調色計算を行なった場合の色合わせ精度を比較して、調色計算用分光光度計として使用可能かどうかを明らかにする。

分光光度計-I：プリズム方式分光光度計（最小波長分解能 0.5nm）

分光光度計-II：プリズム・グレーティング方式分光光度計（最小波長分解能 0.34nm）

分光光度計-III：干渉フィルタ方式分光光度計（16枚の干渉フィルタ透過特性と付加色フィルタは表6-1に示す。）

分光光度計-IV：フォトダイオード一次元配列とグレーティングの組合わせによる高速分光光度計（第三章参照）

15枚の色見本群を対象とし、上記四種の分光光度計で得られたデータをもとにそれぞれ色合わせ評価シミュレーション計算を実行した結果が図6-4である。図中曲線 a, 曲線 b はそれぞれ分光光度計-I, IIを使用した場合の色合わせ精度推移であり、ここでの比較の基準である。曲線c は分光光度計-IIIの状態Aの場合、すなわち使用する16枚の干渉フィルタに対し短波長側の副透過帯の遮断だけ考えて色フィルタを付加した場合の精度推移である。この場合曲線 a, bと比較して色合わせ精度が著しく低下しているが、これは干渉フィルタ中心波長ずれによる誤差、透過帯の裾の広がりによる漏えい光の影響により、分光測定値そのものの精度が劣っているためと考えられる。

したがって干渉フィルタの副透過帯の遮断だけでなく、長波長側・短波長側ともに漏え

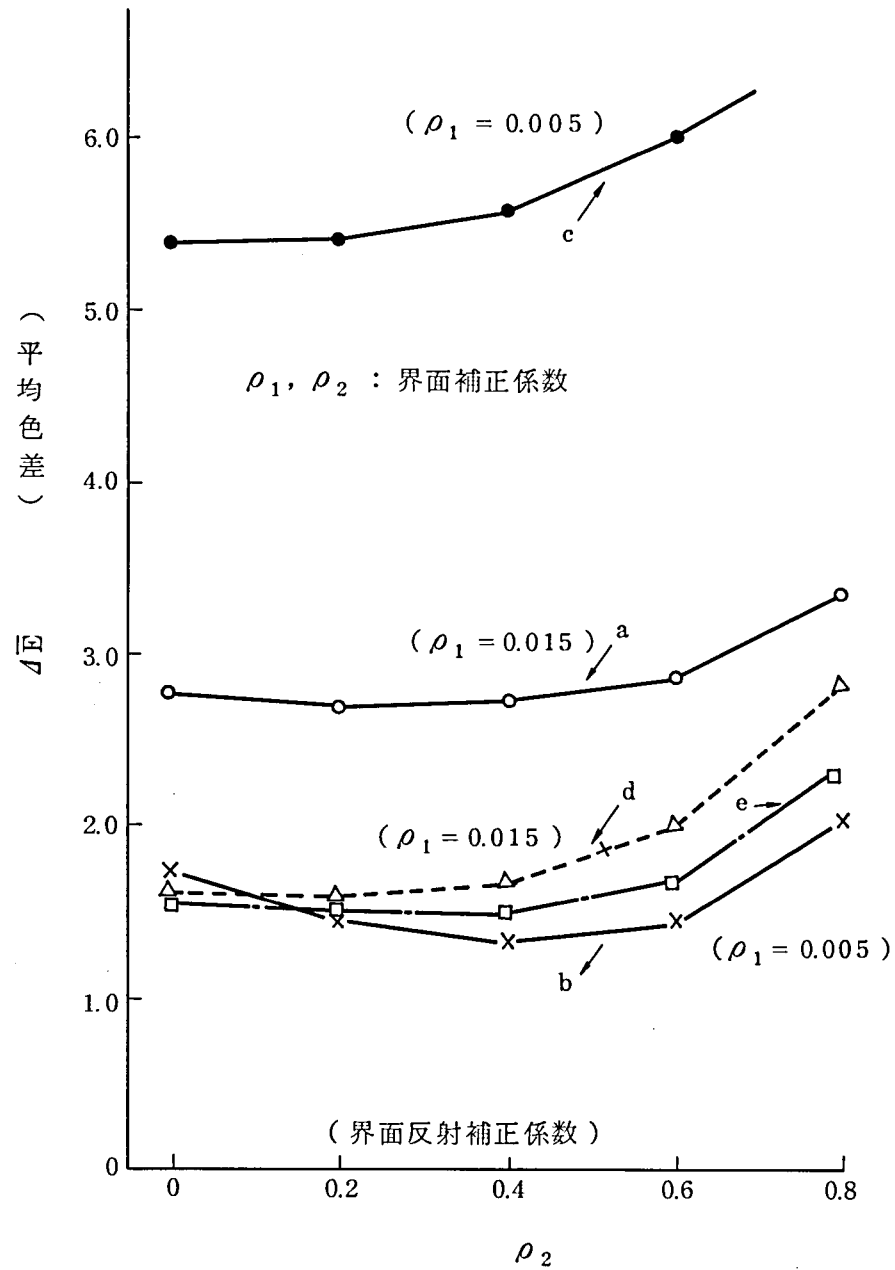


図 6 - 4 各種の分光光度計を使用した場合の
等色精度の比較図

表 6-1 16枚の干渉フィルタ透過特性と付加色フィルタ（状態A，状態B）

目標波長 λ_0	透 過 中 心 波長, λ_m (測定値)	中心波長偏差 $\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_0$	最大透過率 T_m	半値幅 HW	付加色フィルタ 状態A	付加色フィルタ 状態B
400 nm	404.0 nm	+4.0 nm	43.2 %	11.5 nm	一般ガラス	V-V 40
420	418.5	-1.5	41.5	10.1		V-V 44
440	440.5	+0.5	41.7	9.8		V-B 46
460	464.0	+4.0	36.2	8.0		V-G 50
480	482.5	+2.5	36.0	8.5		V-G 52
500	498.5	-1.5	42.1	9.6	V-V 40	V-G 52
520	526.5	+6.5	39.1	9.5	V-Y 50	V-0 54
540	543.5	+3.5	42.2	9.3		
560	569.0	+8.9	40.5	8.3	V-0 56	
580	586.0	+6.0	40.0	8.2		
600	604.0	+4.0	40.0	8.5		V-0 58
620	628.0	+8.0	39.0	8.2		
640	645.5	+5.5	40.0	9.5		
660	667.5	+7.5	39.5	9.3		V-R 64
680	688.0	+8.0	42.3	11.0		
700	706.5	+6.5	42.0	9.5		

い光除去を十分考慮して色フィルタを付加し、さらに測定データの中心波長誤差補正を計算機側で行なった場合（状態B）の精度推移を見ると図6-4、曲線 d となった。状態Bの場合の色フィルタ付加内容は表6-1の中に示した。中心波長誤差補正式は分光反射率曲線を局所的に二次曲線で近似することにより補正を行なった。その具体的な計算式は3章4節に示した式と同じである。状態B（曲線 d）の場合は状態A（曲線 c）の場合と比較して色合わせ精度は大幅に改善されており、分光光度計-Iを使用した場合（曲線 a）より良好な結果が得られており、分光光度計-IIを使用した場合（曲線 b）と比較してもほとんど差が見られない。このことから見て色フィルタによる漏えい光対策、計算機側での中心波長ずれ補正を十分に行なえば、干渉フィルタ式分光光度計が調色計算用の分光光度計として十分使用できると言える。

図6-4における曲線 eはフォトダイオード一次元配列を応用した高速分光光度計を使用した場合の色合わせ精度を表わす。この場合でもプリズム・グレーティング式の分光光度計と比較して遜色のない色合わせ精度が得られている。

干渉フィルター式の簡易型分光光度計は比較的低価格な調色計算装置を構成する場合に有効であり、フォトダイオード一次元配列を使用した高速分光光度計は処理能力の高い調色計算装置を構成する場合に有効である。

6. 4 調色計算装置の構成

調色計算装置（CMS-100型）は分光光度計、操作盤、計算機、標準入出力機器で構成される。装置の外観を図6-5にブロック構成を図6-6に示す。

6. 4. 1 分光光度計

CMS-100型における分光光度計の構成を図6-7に示す。またその外観を図6-8に示す。調色計算に適すように種々の配慮を行っている。照明光源（LS）から出た光は測定資料（CS）を円周45°方向から照明し、垂直方向の反射光を受光する。これにより資料測定の方法依存性を無くしている。分光しない光で照明し、反射光を分光する方式を取っているため蛍光性の物体色の測定も可能である。

分光は干渉フィルタを使用して行うが、この方式による分光光度計が調色計算に十分な測定精度をもつことは6. 3節で明らかにした。透過中心波長が400nmから始まって20nm間隔の16枚の干渉フィルタを円盤（IFD）の同心円上に配置し、円板を回転させて16波

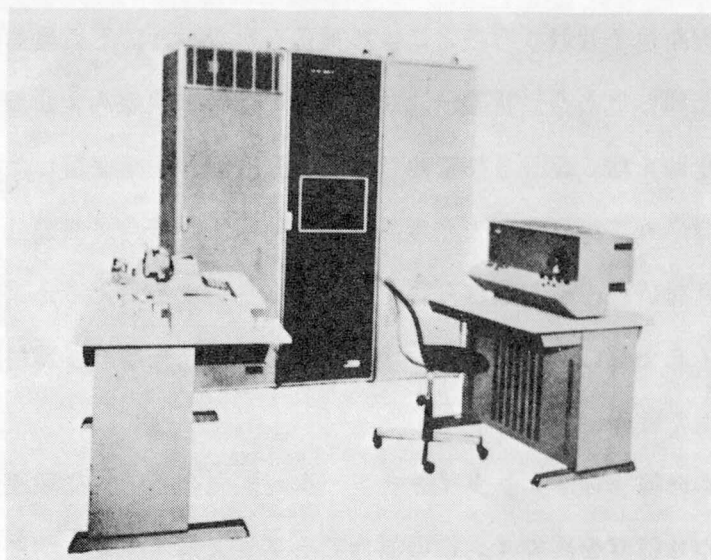


図 6-5 調色計算装置（CMS-100型）の外観

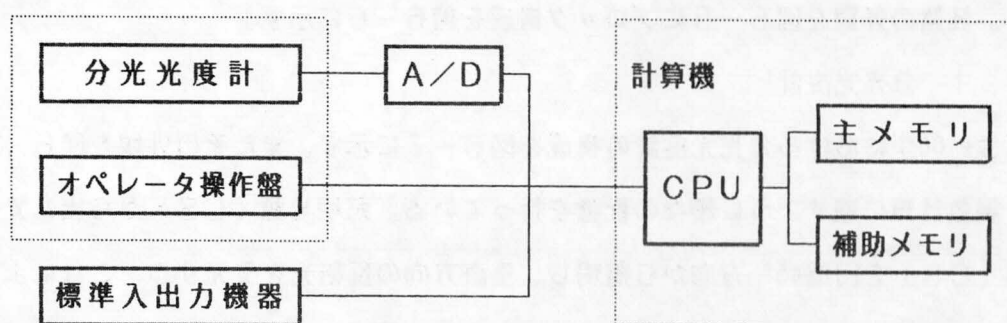


図 6-6 調色計算装置の基本構成図

長点での分光を行う。したがってこの分光光度計では波長 400nm から 700nm 間の 20nm 間隔の分光反射率を測定することができる。測定時間は円盤の一周時間で決り 16 秒～40 秒である。受光器 (PM) の出力は計算機に直接入力しているため、ドリフト補正、0%, 100% 校正は計算機内で自動的に実行する。

6. 4. 2 操作盤

図 6-8 に示した分光光度計の前面に調色計算装置の操作盤を併設している。操作盤は処理機能選択ダイヤル、色材選択スイッチなどにより構成されており、調色計算装置のすべての操作はこの操作盤を通じて可能である。調色計算装置 CMS-100 型は多くの機能を持ち、主要な機能は次の 7 種である。

F_1 : 第一処方計算

F_2 : 修正処方計算

F_3 : 三刺激値 (X, Y, Z) 及び色度座標値 (x, y) 計算

F_4 : 二つの色見本間の色差 (ΔE_A , ΔE_C) 計算

F_5 : 分光光度計の校正処理

F_6 : 下地材料および基準色材データの編集

F_7 : 色材の最適組み合わせ決定処理

これらの処理機能は操作盤上の機能選択ダイヤルにより選択実行することができる。

調色計算装置内に多数の基準色材および下地材料のデータ・ファイルを作成し、個々の調色計算に当って使用する色材および下地を指定する必要がある。操作盤上に色材および下地材料指定スイッチ (色材用に 35 個、下地材料用に 5 個) を設け、このスイッチ操作により容易に色材や下地材料の指定ができる構成とした。たとえば色材に関しては i 番目、j 番目、k 番目スイッチが入になり、下地材料については n 番目スイッチが入になった状態で第一処方計算を実行すれば、調色計算装置は指定された色材組み合わせで処方計算を行う。

一般に計算機応用装置では種々のパラメータ設定のため煩雑な操作が必要であるが、ここに述べる操作盤を持つ分光光度計によれば、計算機存在を意識せずに迅速かつ確実に調色計算装置を操作することができる。

6. 4. 3 計算機

1) 必要記憶容量

調色計算を実行するために必要な記憶容量は基準色材データのファイル容量で異なるが最低限14Kワード程度は必要である。その内わけは、

a) 基準データ：約 4.0Kワード

最大35種の基準色材、5種の下地材料の分光反射率データと付属データをファイルする場合。一つの色材に約 110ワードの基準データ・領域を充当する。

b) 調色計算プログラム：約 7.0Kワード

第一処方計算、修正処方計算、最適色材組合わせ決定処理を中心に、図6-3に示される調色計算を実行する。

c) 入出力処理ルーチン：約 3.0Kワード

分光光度計からの入力処理、計算結果の出力などを行う。

2) 処理時間

調色計算は乗除算を主体とする数値計算であり、計算精度を高く取る必要があるから32ビット程度の浮動小数点演算を行う。調色計算に必要な処理時間は使用する計算機の性能と指定する色材の数や色見本の状態によって異なる。代表的な小型計算機としてTOSBAC-40C (32ビット浮動小数点数の加減算 $26.3\mu\text{sec}$, 乗算 $45.4\mu\text{sec}$, 除算 $101.3\mu\text{sec}$) を使用し、色材を三個指定して調色計算を行う場合の所用時間は

a) 明度の高い色見本に対する第一処方計算：約 0.25 秒～ 0.65 秒

b) 明度の低い色見本に対する第一処方計算：約 0.65 秒～ 1.25 秒

c) 修正処方計算：約 0.25 秒

であった。色材の最適組合わせ選択処理を行う場合には、上記の第一処方計算時間に対して色材組合わせの回数倍の処理時間を必要とする。

ここでは TOSBAC-40C を具体例として処理時間を評価したが、分光光度計とのオンライン結合が可能であり、浮動小数点演算が高速にできるものであれば、いわゆるミニコンピュータやマイクロ・コンピュータ程度の計算機であっても適用可能である。

6. 4. 4 高速型調色計算装置

第三章に述べた高速分光光度計を使用して調色計算装置を試作し、その機能を評価した。試作装置の外観を図6-9にその構成ブロック図を図6-10に示す。分光反射率測定に必

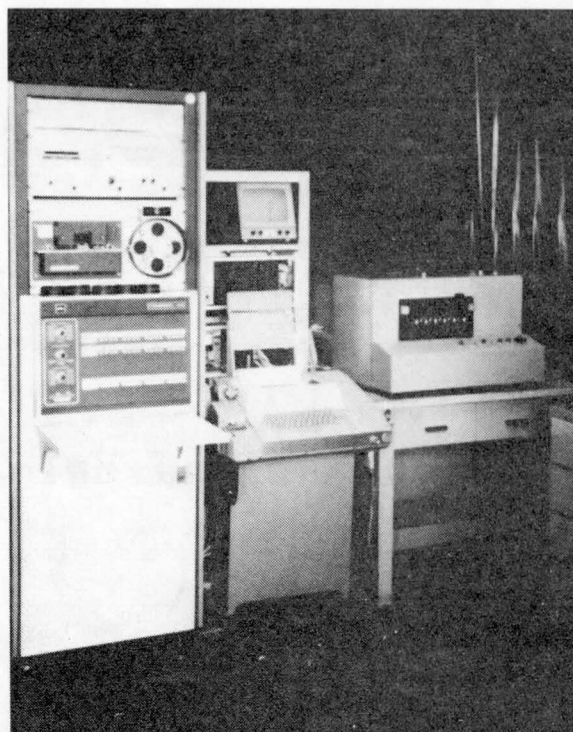


図 6-9 高速型調色計算装置の外観図

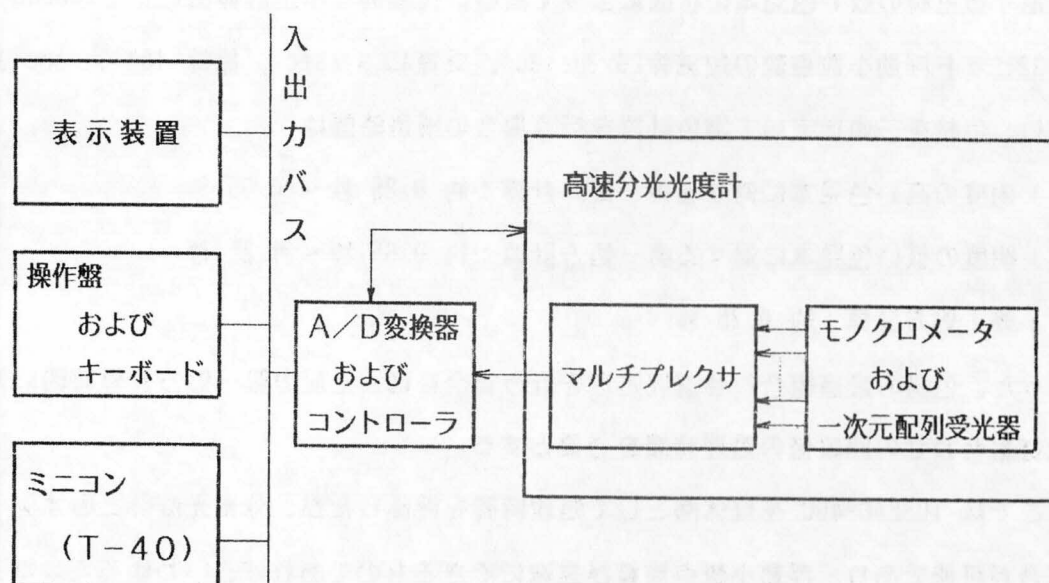
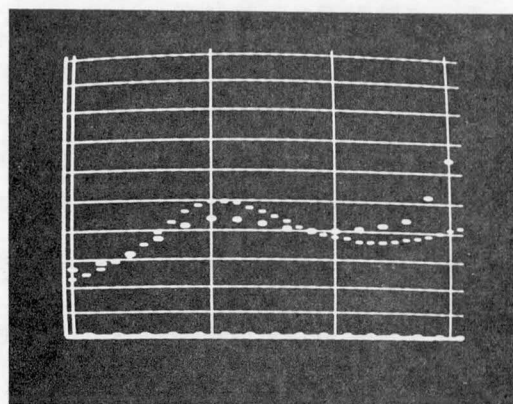
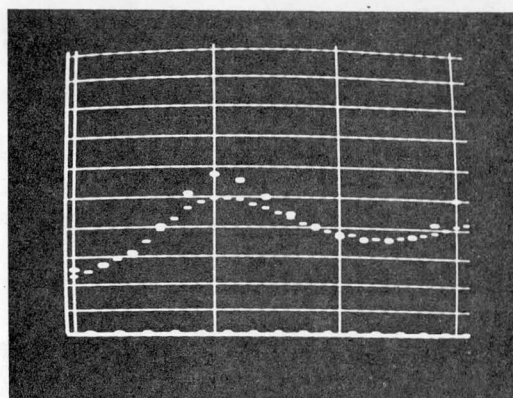


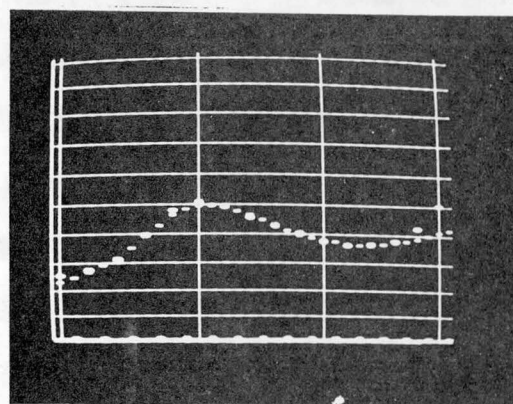
図 6-10 高速型調色計算装置のブロック構成図



指定色材
Yellow No.1
Blue No.3



Yellow No.1
Blue No.4



Yellow No.1
Blue No.4
Red No.2

図6-11 対話型処理による調色計算の
際の分光反射率曲線表示例

要な信号処理と調色計算に必要なデータ処理を同じ計算機で実行させている。第三章で明らかにしたようにフォトダイオード次元配列を使用した高速分光光度計では分光反射率データを1秒で計算機に入力することが可能である。また調色計算処理は前項で明らかにしたように0.25秒～1.25秒である。高速型調色計算装置ではデータ入力時間と調色計算時間とのつり合いが良く取れた処理が可能である。

分光反射率データは表示装置にグラフ化して表示する。この表示装置と操作盤とを通じて会話型で調色計算を行うことにより、色材の組み合わせを効率良く決定することができる。色合せ見本の分光反射率値と、調色計算結果の分光反射率値とを比較表示し、分光反射率値のずれを評価しながら指定色材を順次変更して色材の組み合わせ決定を行う状況を図6-11に示す。

高速型調色計算装置では分光反射率データの高速入力と、表示装置による対話型の調色計算により効率の良い調色処理を実行することが可能である。

6. 5 調色計算装置の適用と評価

6. 5. 1 染色分野への適用

本章に述べた調色計算装置は二定数理論を基礎にしているから、この理論が良くあてはまる対象物ほど適用の効果が期待できる。繊維染色、プラスチック、紙の着色などは二定数理論が良く適用できる分野であるが、その中で需要の大きい染色分野への適用をまず進めた。ウール100%の布からなる色見本9種に対して調色計算を実行し、得られた処方（第一回目処方）により染色した結果と、もとの色見本との間の色差値（CIE '64年色差公式による標準の光Cのもとでの色差）を表6-2の第一回目処方の欄に示す。第一回目処方で色差値が1.5以上表われたサンプル（9種中3種）については修正処方を求め、再染色した結果の色差値を表6-2の修正処方の欄に示す。第一回目処方による平均色差 ΔE_c は1.43、修正処方を加えると平均色差は1.04であり、実用的に十分な結果が得られている。

6. 5. 2 混紡布調色への適用

混紡布は二種類の繊維（繊維aと繊維b）を一定の比率で混合し紡織して得られる布であり、二種類の繊維はそれぞれの繊維専用の染料で染色される。すなわち繊維aは繊維a用の染料（ D_a ）で、繊維bは繊維b用の染料（ D_b ）で染色される。しかしながら一般

表 6-2 調色計算装置適用例（ウール100%布染色の場合）

色見本No.	色見本の三刺激値			調色結果の色差（ ΔE_C ）	
	X	Y	Z	第1回目処方	修正 処方
1	0.369	0.381	0.217	2.45	1.36
2	0.176	0.180	0.085	1.75	0.83
3	0.085	0.083	0.039	1.18	(1.18)
4	0.267	0.241	0.228	1.37	(1.37)
5	0.099	0.082	0.068	2.65	1.14
6	0.045	0.038	0.035	1.07	(1.07)
7	0.244	0.236	0.229	0.53	(0.53)
8	0.087	0.081	0.072	0.95	(0.95)
9	0.035	0.032	0.032	0.96	(0.96)
平均色差（ ΔE_C ）				1.43	1.04

下地：ウール

染料：レベリング染料

に染料 D_a は繊維 a だけでなく繊維 b もある程度染色し、同様に染料 D_b は繊維 a をある程度染色する。この現象は汚染と呼ばれ^{6-4), 6-5)} 調色処理を複雑にする原因となっている。代表的な混紡布（ポリエステルと綿の混紡布）について汚染の状況例を図 6-12 に示す。図からわかる様に汚染の程度は K/S 値にして本来の染色量の 15% 程度にもなっており、調色計算を行う上で無視できない量である。

汚染現象を考慮に入れた場合、分光分布一致方式による調色計算方程式は次の様になる。

$$\begin{aligned} A_{aa}C_a + A_{ba}C_b + Q_{wa} &= Q_{sa} \\ A_{bb}C_b + A_{ab}C_a + Q_{wb} &= Q_{sb} \end{aligned} \quad \dots (6-12)$$

ただし

A_{aa} : 繊維 a 用の染料 D_a の基準色材係数マトリックス

A_{bb} : 繊維 b 用の染料 D_b の基準色材係数マトリックス

A_{ab} : 染料 D_a による繊維 b に対する汚染係数マトリックス

A_{ba} : 染料 D_b による繊維 a に対する汚染係数マトリックス

Q_{wa}, Q_{wb} : 繊維 a の無染色下地および繊維 b の無染色下地の K/S 値ベクトル

Q_{sa}, Q_{sb} : 繊維 a および繊維 b に対する色合せ見本色の K/S 値ベクトル

C_a, C_b : 繊維 a に対する処方および繊維 b に対する処方

両繊維を同じ色に染色する場合は $Q_{sa} = Q_{sb}$ である。式 (6-12) の解 C_a, C_b は本章式 (6-4) の場合と同様に最小自乗法で求める。

ポリエステル (P) と綿 (C) からなる混紡布 (P/C, 重量比で $P=65\%$, $C=35\%$) を例に取り、15 種の色合せ見本を対象にして混紡布調色計算を行った結果を表 6-3 に示す。図において第一回目処方による染色実験結果の色差値と、修正計算を実行した後の処方で再度染色実験を行った結果の色差値を示す。第一回目処方の平均色差 (ΔE_c) が 2.85 (CIE 単位)、修正処方の平均色差が 1.79 となった。この結果は単一繊維からなる布の調色計算の場合 (本章 6.5.1 項) と比較してかなり等色精度が低い、混紡布の調色は人間の目による試行錯誤的な方法でも種々の困難が伴うから、表 6-3 に得られた結果は実用的に十分効果が認められる。

6.6 まとめ

調色計算装置 CMS-100 型を例に取り、基礎式、計算機プログラム、分光光度計など調

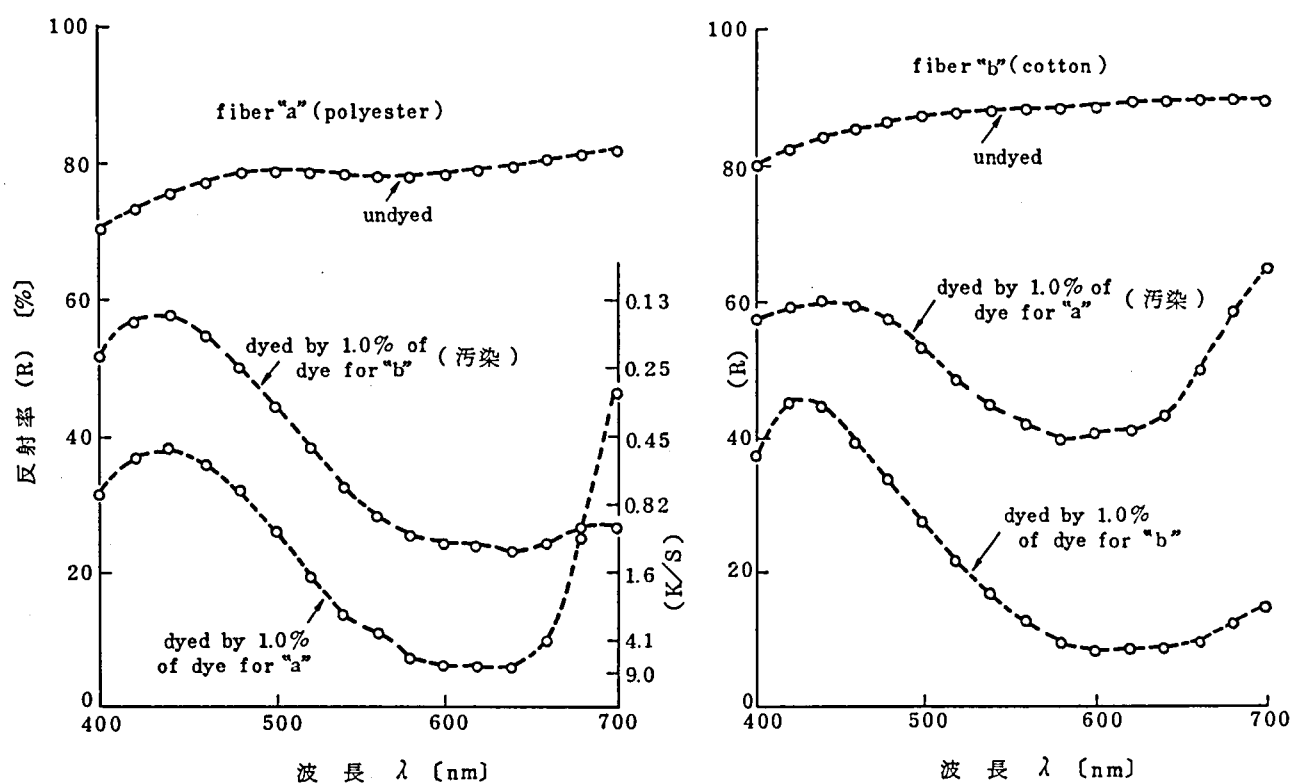


図 6 - 12 混紡布染色における汚染現象を示す図

表 6-3 混紡布調色計算への適用例（ポリエステル65% 綿35%布）

色見本No.	色合せ見本の三刺激値			調色計算結果の色差	
	X_c	Y_c	Z_c	第一処方	修正処方
1	0.115	0.108	0.344	2.77	1.26
2	0.475	0.482	0.629	0.99	(0.99)
3	0.326	0.335	0.448	1.81	2.14
4	0.612	0.497	0.609	0.61	(0.61)
5	0.246	0.137	0.112	0.93	(0.93)
6	0.229	0.268	0.113	3.54	2.71
7	0.240	0.268	0.099	4.68	3.10
8	0.075	0.069	0.057	7.59	2.93
9	0.565	0.562	0.454	1.39	0.85
10	0.075	0.094	0.167	3.94	2.16
11	0.527	0.527	0.479	2.72	1.34
12	0.786	0.837	0.722	0.85	(0.85)
13	0.282	0.228	0.453	2.91	2.84
14	0.164	0.111	0.270	5.72	3.07
15	0.374	0.317	0.073	2.32	0.95
平均色差 ΔE_c				2.85	1.79

色計算装置の構成方法を論じた。要点は、

- 1) 調色計算は分光分布一致方式と三刺激値一致方式が考えられ、両者を組み合わせた等色計算方法が実用的には効果的である。等色計算の基礎になる二定数理論において個々の色材の K/S 値は C （色材濃度）の広い範囲では必ずしも直線性が良くないから、4~6 点の折線近似表現が効果的である。
 - 2) 干渉フィルター式の分光光度計は等色精度の点から見ても調色計算に充分使用できる。調色計算機能の選択指示や色材組合せ指示などを、専用に設けた操作盤を通じて行い、しかも分光光度計と操作盤を一体化することにより、操作性がすぐれた調色計算用の分光光度計を実現することができる。
 - 3) 浮動小数点数の乗除算を高速に実行できる計算機を使用すれば、調色計算は多くの場合 1秒内で処理できる。フォトダイオード一次元配列を使用した分光測定器と組み合わせれば、測定時間と処理時間のバランスが取れた対話型で効率の良い調色計算装置を構成することができる。
 - 4) 調色計算装置を染色分野に適用し、その有効性を示した。混紡布に対しても調色計算アルゴリズムを開発し、実用レベルに達する等色精度を確認した。
- 調色計算装置は単に色材の処方を計算するだけでなく、条件等色の解析、コスト分析、色材のデータ・ベース構築など総合的なCAC（Computer Aided Coloring）として今後増々その重要性が高まると考えられる。

第七章 色彩画像解析システム^{7-7), 7-8)}

7. 1 はじめに

工業製品や印刷物など対象物の色彩情報に注目した検査判別業務を自動化したいとする要求は年々高まっているが、対象物の色は必ずしも均一ではなく、さまざまな色が二次元的に分布している場合が多い。この場合対象物の色彩情報を色彩画像としてとらえ、これを良く解析・分析して検査判別のためのアルゴリズムを研究する事が重要となる。しかしながら一般に色彩画像の情報量は極めてぼう大である。たとえば20cm角の色彩画像を10本/mmで走査し、赤、緑、青の各バンドを8ビットでデジタル化するとすれば総情報量は9.6Mビットにもなる。この様にぼう大な情報量となる色彩画像を通常の計算機で解析しようとするると次の様な問題が生じる。

a) 処理そのものに多くの時間がかかり迅速な解析ができない。特に多数のパラメータについて実験を行い、試行錯誤的にアルゴリズムを開発する様な事は不可能である。

b) 適当な画像出力手段がないため、視感的に画像処理結果を評価することができない。

などである。また色彩画像は測定に高い面分解能が要求されるから、既存の分光光度計や色彩計では効果的に色彩情報を測定することができない。色彩情報をいかに精度良く計算機に入力するかも、色彩画像を解析する際の重要な問題となる。

色彩画像をデジタル処理で解析するシステムについては伊藤⁷⁻²⁾や田島⁷⁻⁴⁾らがすでに報告しているが、これらはシステムの中核となる画像処理に通常の計算機を使用しているため上記a)の問題を本質的に解決するものではない。

本章ではこの様な問題を解決する目的のもとに、高速画像処理装置を応用した会話型の解析システムについて述べ、色彩画像解析システムの構成方法を明らかにする。この色彩画像解析システムにより、色彩画像を対話型で高速にかつ柔軟に処理・解析する事が可能であり、色彩画像を対象とした各種の処理アルゴリズムの開発を効率良く実行できるようになる。本章ではこの様な色彩画像解析システムとその中心となる汎用画像処理装置および色彩画像解析ソフトについて述べ、さらに具体的な色彩画像解析例によりここに述べる色彩画像解析システムの効果を評価する。

7. 2 色彩画像解析システムの構成

色彩画像解析システムの基本構成を図7-1に示す。表示装置に表示される色彩画像を人間が見ながら、操作端末から処理の指示を与える会話型処理の形態⁷⁻¹⁾を取る。色彩画像入力装置は対象となる色彩画像の特性に合わせて複数種類で構成している。画像入力装置から画像処理装置への色彩画像転送はオンライン入力が可能であるが、一旦補助記憶装置に収録したオフライン入力も可能としている。

7. 2. 1 色彩画像入力装置

色彩画像データを入力する装置は走査方式のちがいによりいく種類かにわかれる。機械式走査、電子式走査、電子・機械式走査、光走査に分けて、それぞれ色彩画像入力の特性を分析すると表7-1⁷⁻⁵⁾となる。測色精度、位置精度、分解能などの面から見て、印刷物やフィルムなど紙状の色彩画像を対象とした入力装置としては、機械式のドラムスキャナが適している。三次元的対象物の色彩画像を高速に入力する手段としてはカラーI TVカメラが適している。本章で述べる色彩画像解析システムではカラー・ドラムスキャナとカラーI TVカメラを色彩画像入力装置として使用した。

(A) カラー・ドラムスキャナ⁷⁻⁵⁾

解析システムに接続したドラムスキャナの構成を図7-2に示す。ドラムの回転速度、サンプリング・ピッチ、受光アパーチャー径が可変であるから解析の目的に合わせた最適状態でデータを入力することができる。色分解受光器は光電子増倍管と色フィルタの組み合わせで実現し、赤 (Red) , 緑 (Green) , 青 (Blue) の三受光器と白黒専用受光器 (B/W) の4受光器式である。

このドラムスキャナは透過率測定、反射率測定ともに可能であり、オートゼロ機能によりドラム一周ごとに100%校正を行う。さらにデジタル・ダイノード電圧制御によりアパーチャー径が変化(最大変化1:40)した場合でも受光器信号出力レベルを一定とする様な制御を行う事により、高い測光精度を得ている。各バンドの出力信号は有効8ビット以上の精度を持つ。入力速度を低くする場合には有効10ビット以上の精度を得ることも可能である。

(B) カラーI TVカメラ

カラーI TVカメラの出力は一般にNTSC信号であり、これをR・G・B型の画像処理装置で解析するためには、NTSC信号からRGB信号への変換処理が必要である。

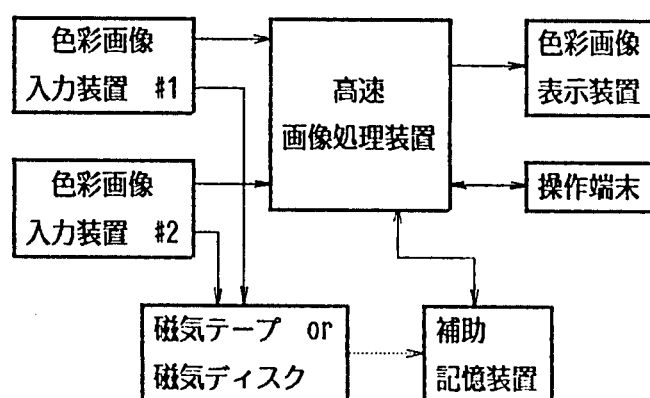


図 7-1 色彩画像解析システムの構成

表7-1 各種画像入力方式の比較

特 性 走 査 方 式	データ精度	位置精度	画面分解能	データ速度
機 械 式 (ドラムスキャナ)	非常によい。 8ビット以上有効	非常によい、位置誤差 0.1%以内に収まる。	非常に分解能が高い 300 mmを 12000分割 できる	割合に速い。 1色当り100kピクセル ／秒程度
電 子 式 -I (撮像管式 ITVカメラ)	あまりよくない。 有効6ビット 調整によって変る。	あまりよくない。 偏向の直線性・安定性 に問題がある。	低い。 画面分解能 500～1000 程度	3.8Mピクセル／秒以 上 コンピュータ入力のためにはバッファメモリ が必要
電 子 式 -II (固体素子 ITVカメラ)	撮像管方式より安定度 が高いがダイナミック レンジがせまい。	非常によい。 光学系の倍率を合わせ こむ必要がある。	低い。 画面分解能 200～ 500 程度	速すぎるがクロックレ ートを変えることがで きれば使い易い
電子・機械の ハイブリッド方式 (CCD ライン・センサ)	固体ライセンサを使用、 安定度が高いが、ダイ ナミックレンジがせま い。	非常によい。 光学系の倍率を合わせ こむ必要がある。	かなり高い。 1走査2048分割できる	可変であって外部機器 とのマッチングが容易
光 走 査 式 (フライングスポット 又はレーザスキャナ)	スロースキャンとすれ ばかなりよい。	フライングスポット方 式はあまりよくない (撮像管方式と同じ) レーザ方式は光学系の 精度による。	フライングスポット方 式は撮像管並みで低い。 レーザ方式はかなり高 い。一走査4000分割で きる。	スロースキャンとすれ ば外部機器とのマッ チングがとれる

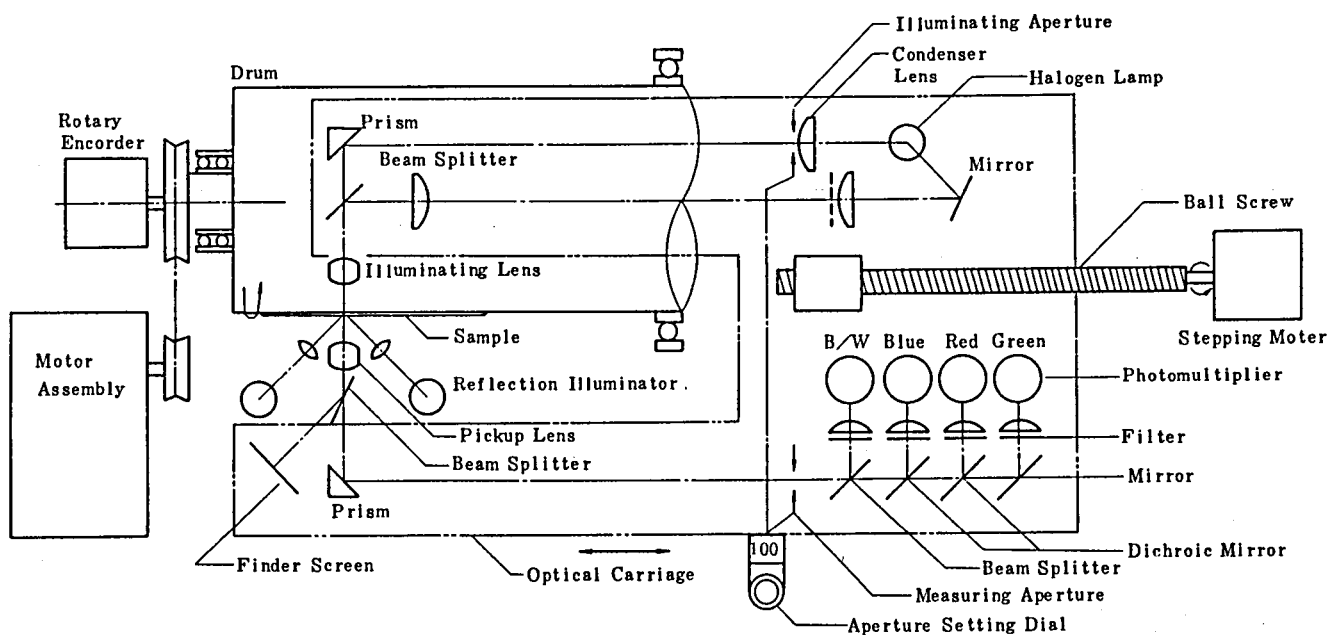


図 7-2 ドラムスキャナの構造

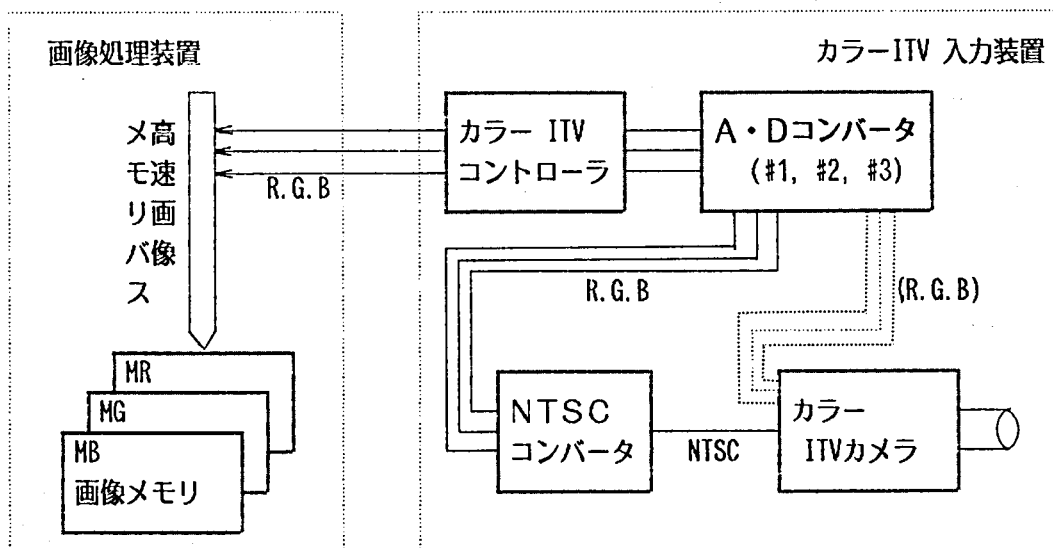


図 7-3 カラーITVカメラによる色彩画像入力系の構成

NTSC信号 (E_{nt}) は式 (7-1) に示されるように輝度信号 Y と、カラーサブキャリア f_{sc} で変調された色度信号が多重化された形式である。

$$\begin{aligned} E_{nt} &= Y + I \cos(W_{sc}t + 33^\circ) + Q \sin(W_{sc}t + 33^\circ) \\ &= Y + 0.493(B-Y) \sin W_{sc}t + 0.877(R-Y) \cos W_{sc}t \\ &= Y + C \cdot \sin(W_{sc}t + \phi_c) \end{aligned} \quad \dots (7-1)$$

ただし、 $C = [\{0.493(B-Y)\}^2 + \{0.877(R-Y)\}^2]^{1/2}$

$$\phi_c = \tan^{-1} 1.78 (R-Y) / (B-Y)$$

$$W_{sc} = 2\pi f_{sc} = 2\pi(455/2)f_n$$

$$f_{sc} = 3.5798 \text{ MHz} : \text{カラーサブキャリア周波数}$$

$$f_n : \text{ライン走査周波数}$$

$$Y : \text{輝度}, R : \text{Red}, B : \text{Blue}$$

式 (7-1) で表わされるNTSC信号を $f_s = 4f_{sc}$ で標本化すれば、ライン間で色度信号は位相が逆になるため、1ラインメモリを用いて加減算を実施すれば容易に輝度 (Y) と色度 (C) が分離できる。⁷⁻⁹⁾ 色度信号 C を $\sin W_{sc}t$ および $\cos W_{sc}t$ で復調処理をすれば

$$C_s = B - Y, C_c = R - Y \quad \dots (7-2)$$

が得られる。また

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \quad \dots (7-3)$$

であり、式 (7-2), (7-3) より三原色信号 R, G, B が求まる。

カラーITVカメラを使用した色彩画像入力系の構成図を図7-3に示す。AD変換器以降の高速画像メモリーブスおよび画像メモリーは3チャンネル並列とすることにより、リアルタイム(毎秒30フレーム)の色彩画像の入力が可能である。標準的なITVカメラにより入力する場合の各画素の精度は有効6ビットである。⁷⁻¹⁰⁾

7. 2. 2 高速画像処理装置⁷⁻³⁾

ディジタル化して画像処理を行う事により、複雑な処理、解析を精度よく安定して実行することができる。しかし逐次処理を基本とする通常のディジタル計算機では本質的に平面並列処理性を持つ画像処理を十分な速度で実行する事は困難である。色彩画像解析システムにおいても対話的に効率良く色彩画像を解析するためにはディジタル型の高速の画像処理装置が重要である。また色彩画像解析システムにおける画像処理内容は多様であるか

ら、画像処理装置には高い汎用性が要求される。このような目的に局所並列処理型の画像処理装置「TOSPIX」が適している。これは、

- 1) 画像メモリーを中心としたシステム構成により、大量の画像データの転送効率の向上を図る。
- 2) 頻繁に使われ、処理時間のかかる基本的な画像演算を選択し各々ハードウェア・モジュール化して高速化をはかる。
- 3) マイクロプログラム制御機構を採用し、演算の柔軟性をはかる。ハードウェア・モジュール化した基本的な画像演算機能はソフトウェアで任意に組み合わせ、処理の汎用性を高める。
- 4) 局所的な並列処理により画像処理全体の高速化をはかる。

ことを特徴とした汎用の高速画像処理装置である。この高速画像処理装置は通常の汎用ミニコンピュータ等と比較して、数十倍以上の処理速度が得られるため会話型の色彩画像解析を迅速に行うことができる。

A) 高速画像処理装置の機能

「TOSPIX」は画素ごとまたは局所領域（例えば、ある画素を中心とした 3×3 の近傍領域）ごとの画像演算機構と、その演算を画像全体に繰り返し実行する走査機構とで画像を処理する装置である。ハードウェア・モジュール化し高速化した基本的な画像処理機能を以下に示す。これらの機能は画像処理応用や画像認識などでよく使われ、色彩画像解析においても基本的なものである。

(a) 空間フィルタリング（二次元コンボリューション）

$$G(X, Y) = \sum \sum W_{ij} \cdot F_{ij}(X, Y)$$

荷重係数 W_{ij} と点 (X, Y) の近傍画素 F_{ij} との積和演算で与えられ、微分、平均化、強調、マッチングなどの処理に用いられる。

(b) 最大・最小・中間値検出フィルタ 3×3 の局所領域内の中間値（最大・最小も可能）を求め、出力値とする。エッジを保った平均化、線要素追跡などに利用される。

(c) 論理フィルタリング 二値画像に対する処理で、 3×3 の局所領域内のビットパターンによって出力値を決定する。幾何学的特徴点（端点、分岐点、孤立点など）の抽出、細線化、境界線抽出などによく用いられる。

(d) 領域番号付け 二値画像内の連結している“1”の領域を区分し、領域番号を付

けていく処理で、粒子の面積分布を調べるときに必要な機能である。

(e) データ変換

$$G(X, Y) = \Phi \{ F(X, Y) \}$$

画素ごとにテーブルの内容 (Φ) で変換する処理で、コントラスト強調、 γ 補正、二値化、色彩画像の色調変換などに利用される。

(f) ヒストグラム計算 画素ごとの濃度値の出現頻度を求める処理である。二値画像であれば、“1”の数すなわち面積の計測になる。色彩画像では色バンド成分 (R, G, Bバンド) ごとにヒストグラムを求める。指定領域の平均色を求める場合にもヒストグラム計算機能が有効に働く。

(g) 線形座標変換 (アフィン変換) a, b, c, d, e, f を座標変換係数とし、

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} X_i, Y_i : \text{入力座標} \\ X_0, Y_0 : \text{出力座標} \end{array}$$

画像の拡大、縮小、回転、移動などの操作であり、位置合わせ、大きさの正規化などに用いられる。

(h) 画素間算術論理演算

$$G(X, Y) = Op \{ F_1(X, Y), F_2(X, Y) \}$$

2枚の画像 $F_1(X, Y)$, $F_2(X, Y)$ 間の画素ごとに、Op で指定される算術論理演算 (加減算) を施すもので、シェーディング補正、変化領域検出、各画素の色度座標の変換などに利用される。

(i) 画像データおよび局所処理結果の直接アクセス システムコントローラ内の主メモリ操作だけで、画像データの入出力、局所領域内のデータ入力およびその処理結果 (積和値、ビットパターン、最大・最小・中間値など) を得ることができる。画像メモリのランダムアクセスや局所処理の組合せ演算などが可能である。

以上 (a) … (i) の9種の基本的画像処理の処理速度を表7-2に示す。(a) …

(g) の基本機能について画素当りの処理速度は $1\mu\text{sec} \sim 1.25\mu\text{sec}$ である。したがって 512×512 画素の画像に処理を加える場合、処理に要する時間は $0.26\text{sec} \sim 0.33\text{sec}$ となる。

B) 高速画像処理装置の構成

高速画像処理装置はシステムコントローラ部、画像入出力制御部、画像処理部から成る。

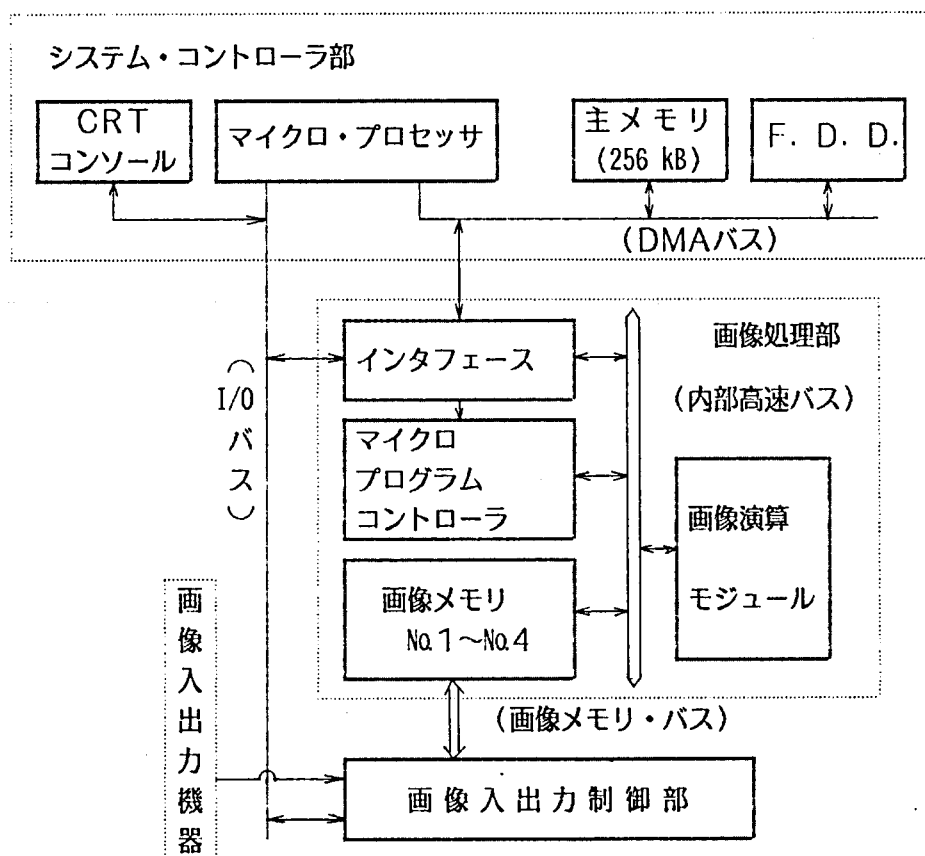


図 7-4 高速画像処理装置 (TOSPIX) のシステム構成

表 7-2 高速画像処理装置 (TOSPIX) の基本処理機能と処理速度

	処理機能	実 用 目 的	性 能
①	空間フィルタリング	画像の微分、平滑ボケ修復、画像強調	1 μ sec /画素
②	線 形 座 標 変 換	画像の拡大、縮小、回転、移動など	1.25 μ sec /画素
③	論理フィルタリング	輪郭線抽出、細線化、孤立点除去など	1 μ sec /画素
④	ヒストグラム計算	濃度値の出現頻度分布、平均色	1 μ sec /画素
⑤	デ ー タ 変 換	コントラスト強調、ガンマ補正、量子化など	1 μ sec /画素
⑥	領 域 番 号 付 け	2値画像での連結部の領域分け	1.25 μ sec /画素
⑦	最大・中間・最小	画像濃度の極値を求め線追跡を行なう	1 μ sec /画素
⑧	画 素 間 演 算	画像メモリ間での論理演算、シェーディング補正など	2.5 ~ 3.25 μ sec /画素
⑨	デ ー タ 転 送	制御用CPUとのデータ転送	1 ~ 1.5 μ sec /画素

その構成図を図7-4に示す。

(a) システムコントローラ部 コントローラの標準構成は、主メモリ 256KBのマイクロプロセッサ、CRTコンソール、FDDである。その他、磁気テープ、磁気ディスク、紙テープリーダー、ラインプリンタなどの周辺機器も接続できる。

(b) 画像入出力部 画像専用の入出力機器として、ITVカメラと画像ディスプレイを画像メモリに接続できる。さらに、ドラムスキャナなどの入出力機器が画像メモリに接続できるようにバスは開放されている。ITV、ディスプレイを含めて画像入力機器は最大4台まで接続可能である。

(c) 画像処理部 画像処理部はインタフェース、マイクロプログラム・コントローラ、画像メモリ、画像演算モジュールで構成される。画像処理部全体はマイクロプログラムで制御され、各種データの転送は16ビット幅の内部高速バスを介して行われる。

(c-1) インタフェース システムコントローラとの通信（パラメータ、画像データなどの転送）やマイクロプログラム・コントローラの駆動の制御を行う。

(c-2) マイクロプログラム・コントローラ 44ビット/語の命令語をもち、4MHzのクロックで動作する。命令語はROMで4K語まで実装できる。

(c-3) 画像メモリ 標準構成は、画像サイズ 512×512の画像2層である。層数は最大4層まで実装可能で、画像サイズ 256×256、1,024×1,024も可能である。濃度情報は8ビット/画素であるが、ビット位置指定による1ビット/画素も取り扱える。色彩画像を扱うためには3層以上の画像メモリが必要であり、R、G、Bバンドの画像をそれぞれNO.1、NO.2、NO.3、の画像メモリに入力する。

(c-4) 画像演算モジュール 7.2.2項 A) に述べた基本的な画像処理を実行する回路群である。3×3の局所領域の最大・最小・中間値を検出するための比較器、4×4の局所領域データと荷重レジスタ内の係数データとの積和計算回路。データ変換やヒストグラム計算用のテーブル・メモリーなどから構成される。

7.2.3 色彩画像表示装置及び会話端末

色彩画像表示装置は入力画像あるいは処理画像を表示して、操作者とのマンマシン・インターフェースとなる。表7-3に装置の概要を示す。表示のリフレッシュメモリーは画像処理装置の画像メモリーと兼用である。4層の画像メモリー(512×512×8bit)の内3層をR、G、B画像に対応させる。ディスプレイ・モニタは外部同期型のR、G、B式と、

内部同期型のNTSC方式の両モードが可能であるが、画像処理装置からはR、G、Bモードでデータが転送される。

色彩画像の特定の点あるいは特定の領域について色彩解析をほどこす場合、色彩画像表示装置上に示された画像にカーソル表示やエリア表示（ROI：Region Of Interest）を行うが、これは会話端末のキーボードを介して行う。画像処理装置は最大4層までの画像メモリーを持っているから、その内1層をビットプレーンとして使用し、グラフ表示、図形表示も可能であり、解析結果の文字・グラフをかさね合わせて表示する。表示画面の大きさは512×512画素（R、G、B表示）であり、さらに大面積の画像表示のためには分割表示を行う。

7.3 色彩画像解析ソフトウェア

7.3.1 ソフトウェアの全体構成⁷⁻⁶⁾

本章に述べる色彩画像解析システムのソフトウェア構成は図7-5に示すようにサポート・プログラムと画像処理解析プログラムから成っている。サポートプログラムは主にソフトウェア開発に使用するプログラムであり、その内部は入出力管理等行う制御プログラムと言語処理（FORTRAN及びアセンブラ）、プログラム編集などを行うユーティリティ・プログラム群から成っている。これは通常の計算機機能を働かせる場合のソフトウェアである。

画像処理解析プログラムは画像処理及び色彩解析を行うためのプログラムである。これはさらに制御プログラム、サービスプログラムと画像処理解析専用サブプログラムに分けられる。本章で述べる色彩画像解析システムは会話型処理モードとバッチ型処理モードがあるが、画像処理解析専用プログラムはこの会話型処理を実行するための会話制御プログラムと画像処理コマンド群、色彩解析コマンド群、から成っている。

色彩画像解析処理の実行は、会話的に処理コマンドを入力して逐次的に処理を実行する会話型処理と、開発し終った処理プログラムを反復実行するバッチ型処理が可能である。

A) コマンド入力による会話型処理

操作端末を介して処理コマンドを入力し、画像処理結果や色彩解析結果を色彩画像表示装置で確認しながら、処理アルゴリズムを探索したりパラメータを変えて最適な処理アルゴリズムを決定する。色彩画像の各種特徴の解析や処理アルゴリズム（たとえば色彩画像

表 7-3 色彩画像表示装置の基本的特性

モニタ	高精度カラーTVモニタ (512×512画素)
画像メモリ	IC, DRAM 512×512×8ビット 最大4層、画像処理装置と共用
表示方式	RGB直接： 外部同期式 NTSC信号： 内部同期式
図形表示	512×512×1ビット/プレーン、文字、グラフ

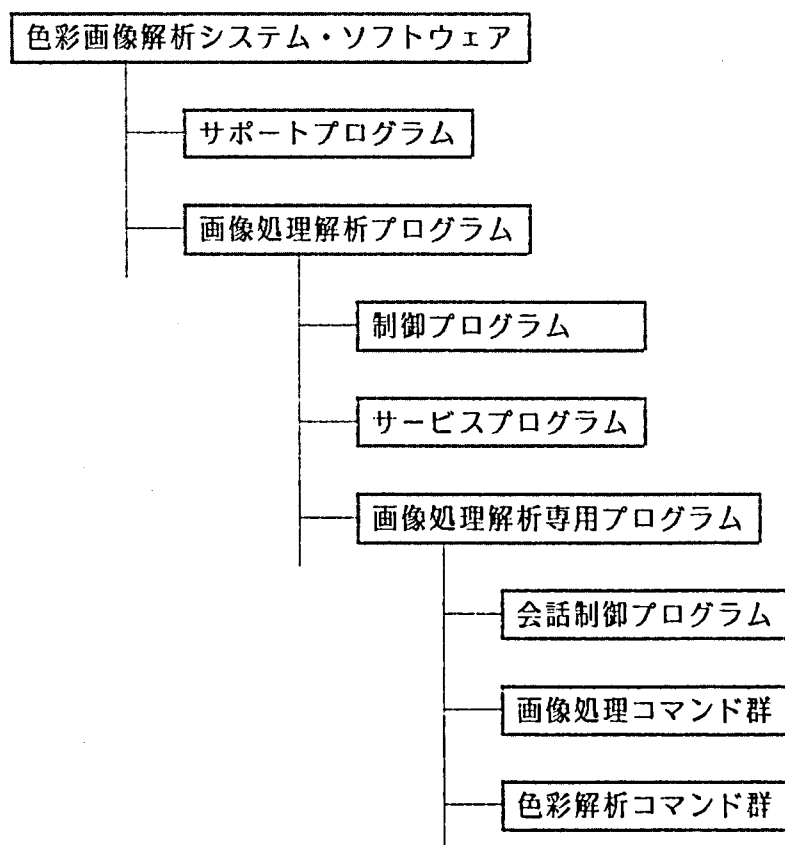


図 7-5 色彩画像解析システムのソフトウェア構成

の認識アルゴリズム)の決定を迅速適確に行う事ができる。

B) バッチ型処理

確立された色彩画像処理解析アルゴリズムをプログラム化し、画像処理装置の上で高速に実行する。大量の色彩画像データの処理解析に有効である。

7. 3. 2 色彩画像処理・解析ライブラリ

7. 2. 2 項 A) に示した高速化されたハードウェア機能を利用して次のような会話処理コマンドを持つ。コマンドは解析内容に応じて容易に追加することができる。

A) 画像処理コマンド

- A-1 画素演算：画素間演算（加減算、論理和、論理積など）、空間フィルタリング、論理フィルタリング、データ変換、フーリエ変換、逆フーリエ変換、コンボルーションなどの処理を行なう。
- A-2 図形文字発生：直線・円弧・等高線や文字記号を画像メモリ内に書き込む。
- A-3 図形の測定：重心・モーメント、最大・最小・平均値、分散・標準偏差、面積、周囲長の測定、ランレングス行列、テクスチャー解析用の差分行列など、図形の各種パラメータを計測する。
- A-4 幾何学操作：画像の拡大・縮小・回転・移動などのアフィン変換、ヒストグラムの等頻度化、画像メモリー内データに対して最大最小値の幅の拡大などを行なう。
- A-5 画像の合成・抽出・分類：画像メモリー内データに対して各種パターンを埋め込む。指定された座標のデータ抽出あるいは指定された条件に合致する画像データの抽出。複数のいき値によるデータの領域分けなどを行なう。
- A-6 グラフ発生：折れ線・棒グラフ、立体図、グレースケール、投影図などを作成する。

B) 色彩解析コマンド

- B-1 色度計算：指定された画素あるいは領域全画素について三刺激値 (R, G, B), (X, Y, Z), 色度座標値 (r, g), (x, y) を求める。
- B-2 色差計算：指定された二つの画素の間の色差、二枚の絵の対応する画素相互の色差を計算。
- B-3 平均色：指定された領域の色彩諸量の平均 (R, G, B, r, g など) 分散、最大、最小を求める。

B-4 色彩変換：指定された画素あるいは領域の色彩に係数をかけ、色調を変える。

B-5 色彩識別：指定された画素の色彩が許容範囲の色である場合に特定のコード（色コード）をその画素に付ける。

a) 三刺激値によるコード付け

$$R_0 + \Delta R > R > R_0 - \Delta R$$

$$G_0 + \Delta G > G > G_0 - \Delta G \quad \text{の時にコード付けする。}$$

$$B_0 + \Delta B > B > B_0 - \Delta B$$

b) 色相によるコード付け

$$r_0 + \Delta r > r > r_0 - \Delta r$$

$$g_0 + \Delta g > g > g_0 - \Delta g \quad \text{の時にコード付けする。}$$

B-6 変化検出：2枚の画像の対応する画素の色彩 (R_a , G_a , B_a),

(R_b , G_b , B_b) において、

$$(R_a - R_b)^2 + (G_a - G_b)^2 + (B_a - B_b)^2 > E_0$$

の時色彩コードを付ける。

7. 4 色彩画像解析例と評価

色彩画像（具体的にはジブラルタル国POUNDS券）をサンプルとし、前節までに述べた色彩画像解析システムにより解析した結果（表示装置への表示結果）の例を図7-6～図7-10に示す。

図7-6では対象色彩画像の任意の二点を指定し、その二点を結ぶ直線上の濃度プロフィールをグラフ化して表示している。ここではR, G, Bバンドの内Rバンドの濃度プロフィールを示している。

図7-7では対象色彩画像の任意領域を指定し、その領域内の特定バンド画像の濃度ヒストグラムをグラフ化して示している。この例ではGバンド画像の濃度ヒストグラムのみ表示しているが、R, G, B 3バンドの濃度ヒストグラムを同時に表示することも容易である。

図7-8では対象色彩画像の任意領域を指定し、その領域内のGバンド画像についてx軸方向、あるいはy軸方向の濃度射影値を示している。任意 θ 方向の射影が取りたい時は、アフィン変換機能で画像を θ 回転して射影を取る。

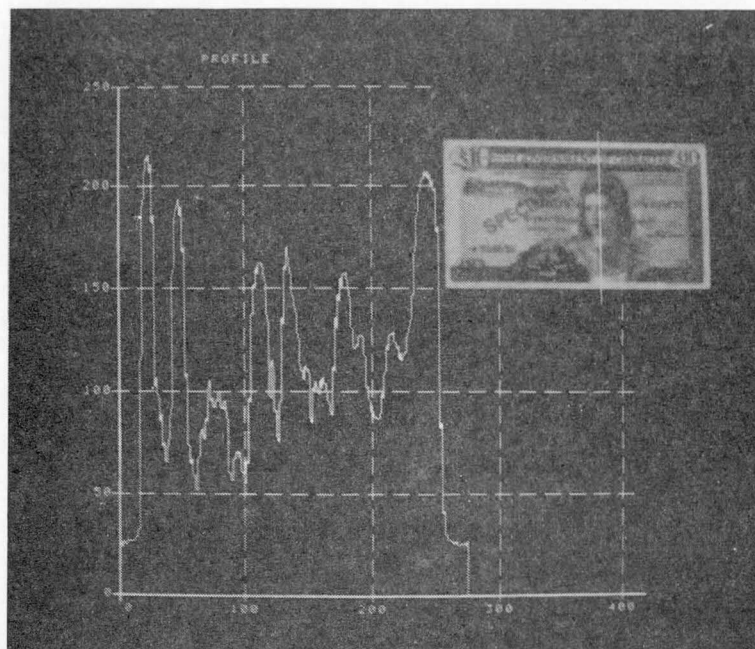


図 7-6 色彩画像の指定断面における
濃度プロフィール表示例

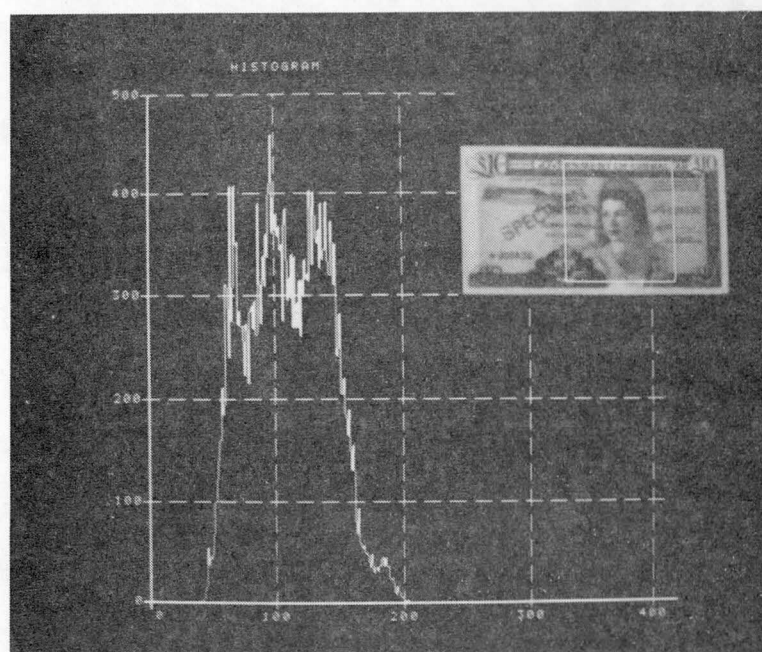


図 7-7 色彩画像の指定領域における
濃度ヒストグラム表示例

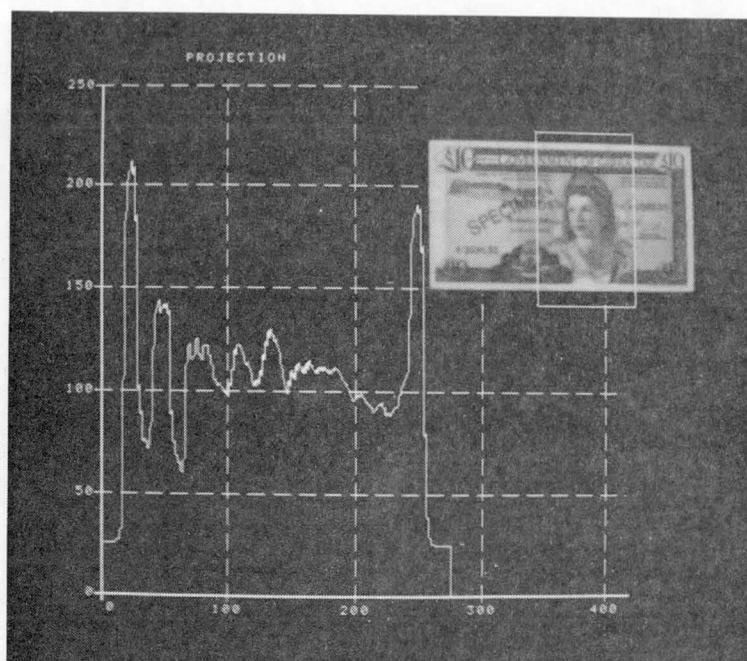


図 7-8 色彩画像の指定領域における
X軸方向への濃度射影信号の表示例

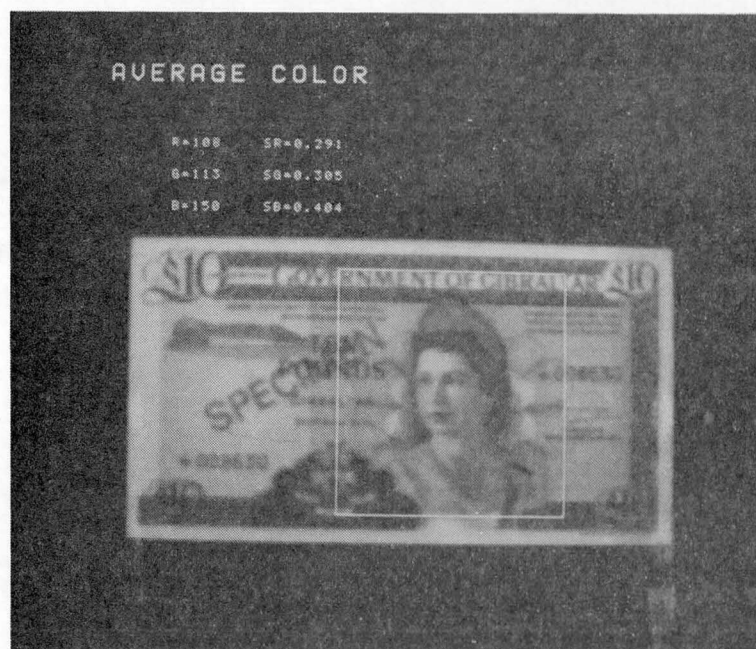


図 7-9 色彩画像の指定領域における
平均色の表示例

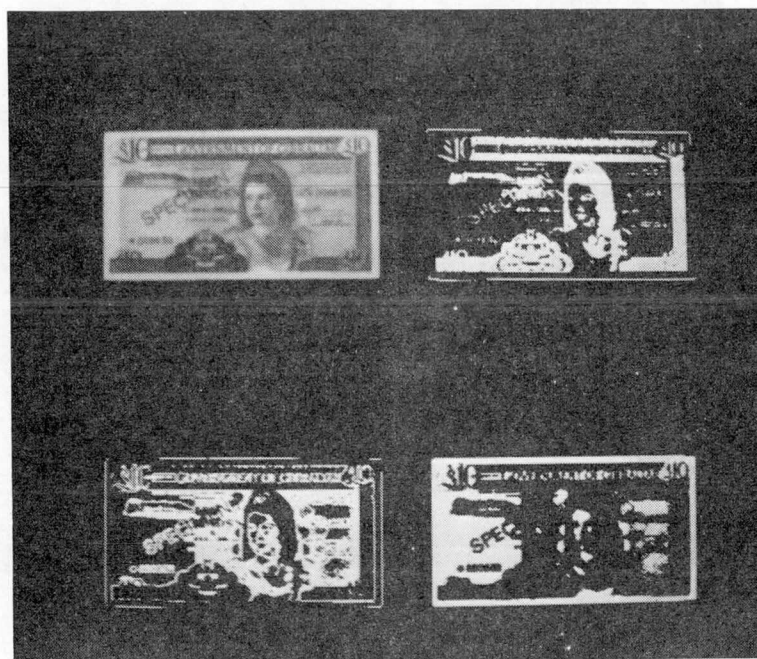


図7-10 色彩画像の解析例
(閾値指定による色認識)

表7-4 色彩画像解析に要する処理時間の比較表

システム形態 解析例	解析システム-I	解析システム-II
	高速画像処理装置を使用 する色彩画像解析システム	通常の計算機を使用する 色彩画像解析システム
1. 濃度プロフィル	0.003秒	2.5秒
2. 濃度ヒストグラム	0.063秒	3.3秒
3. アフィン変換と濃度射影	1.97秒	15.6秒
4. 平均色	0.23秒	13.1秒
5. いき値指定による判別	0.063秒	6.3秒

注 1. 解析対象の画像領域は 250× 250画素

注 2. 解析システム-II

使用計算機：マイクロ・ミニコン (TOSBAC7/20E)

画像データは磁気ディスク内にあり、一ラインの読出し時間は10msec

図 7-9 では対象色彩画像の指定領域の平均色 R , G , B 及び平均色相 \bar{r} , \bar{g} を示している。

図 7-10 では対象色彩画像に対し、濃度いき値を指定し、いき値内の領域を“白”、それ以外の領域を“黒”で示した画像を表わす。

以上の解析例において解析内容の指示および解析領域の指定などは色彩画像解析システムのキーボードから対話的に実行され、解析結果が色彩画像表示装置に表示されるから、柔軟に解析を行うことができる。

本論文に述べる色彩画像解析システムを使用して解析を行う場合の処理時間と、通常の計算機を使用して色彩画像解析を行う場合（概略仕様は表 7-4 の注 2）の処理時間を比較して示すと表 7-4 となる。表 7-4 には上記 5 種の具体的な解析例の処理時間（対象画像領域は 250×250 画素）を示すが、本論文に述べる色彩画像解析システムでは通常の計算機を使用する場合と比較して格段に高速な処理が可能であることがわかる。表 7-4 の例ではアフィン変換と濃度射影解析が最も時間を要し、通常の計算機使用の場合には約 16 秒を必要とするのに対し、本論文に述べる解析システムでは 2 秒以内で解析が終了する。他の多くの解析例についても処理に要する時間は 1～2 秒以内であり、したがって本論文に示す色彩画像解析システムによれば、解析指示に対し瞬時に結果が得られ、効率良く迅速に色彩画像解析を行うことができる。

7.5 まとめ

二次元的に分布する色彩情報（色彩画像）を効率良く解析する手段として色彩画像解析システムについて論じ、ハードウェア、ソフトウェアの具体的な構成方法を示した。要点は

- 1) 色彩画像解析システムは色彩画像の入力装置、処理装置、表示装置、操作用コンソールで構成し、処理解析結果を色彩画像表示装置に表示し、操作者が表示結果を見ながら解析を進める会話型の解析システムが有効である。
- 2) 会話型の色彩画像解析を効果的に行うためには、解析指示に対して迅速な応答が必要であり、また多様な解析を行うためには機能の柔軟性が要求される。したがって高速で汎用性の有る画像処理装置が重要となる。基本となる画像演算機能をハードウェア・モジュール化し、処理コマンドの組み合わせで多様な画像処理・解析を行う型の画

像処理装置が色彩画像解析システムに適している。この場合局所並列処理型の構成を取れば、1画素当りの処理速度を1 μ sec 程度以下にすることが可能であり、大部分の色彩画像解析に関し、待ち時間を感じさせない応答が得られる。

- 3) カラー・ドラムスキャナは測色精度、位置精度、面分解能などの点から見て、色彩画像解析システム用の入力装置として適している。この場合濃度分解能は8ビット以上取れる。汎用入力装置としてはカラー I T V カメラが適しているが、この場合濃度分解能は6ビットどまりである。
- 4) 色彩画像は個々の画素が独立の色彩情報 (R, G, B 3バンドの濃淡情報) を持つと見なされるから、濃淡画像を処理・解析するサブルーチン群と色彩解析サブルーチン群を用意して置けば、これらの組み合わせにより多様な色彩画像解析が可能である。

以上本章を通じて色彩画像解析システムの構成方法を示した。二次元的に分布する色彩情報を対象として、計測方法や認識方法を開発する際に、本章で示した会話型の色彩画像解析システムを使用すれば、処理アルゴリズムの開発やパラメータの最適値設定などを迅速かつ容易に行なうことができる。

第八章 色彩印刷物の判別方式と検査選別装置^{4-6), 8-8), 8-9), 8-10)}

8.1 はじめに

産業界の各方面でオートメーション化が進んでいる中で、目視検査の自動化は技術的にもむずかしい問題があり、最も取り残された分野である。しかしオートメーション化が年々高度化し、目視検査の自動化に対する要求も増々強まってきている。

この様な目視検査の一例として銀行券（色彩印刷物）の検査選別がある。銀行券は中央銀行・市中銀行・実社会を還流しているが、流通過程で汚損・破損などさまざまな損傷を受け、また変造・偽造など異常銀行券が混入する可能性もある。中央銀行や市中銀行では銀行券を常に検査選別し、正常な銀行券のみ流通させる様に努力しているが、①年々増大し、膨大な量になる銀行券を人手だけで検査選別することには限度がある。②人間の感覚による検査選別は検査基準を一定に保つことがむずかしい。などの原因により、銀行券検査選別業務を自動化したいとの強い要求がある。また近年自動預金機や自動販売機など銀行券を扱う自動化機器⁸⁻⁴⁾が急速に発達して来たが、これら機器においても銀行券判別技術が重要である。

銀行券は典型的な色彩印刷物であり、この目視検査を自動化するためには色彩印刷物すなわち色彩画像の種類判別や正否判別の技術が不可欠である。色彩画像を認識する技術はすでにいくつか研究⁷⁻²⁾されているが、これは一般性を重視した基礎的研究であり、装置規模や認識に要する処理時間など、自動化装置にただちに適用できるものではない。

銀行券は汚れ、折れ、破れなど雑音成分の多い色彩画像であるから、その特徴を十分に考慮した高速の判別方式が必要となる。前章で述べた色彩画像解析システムを活用し、銀行券色彩画像の特性を良く分析した結果、本章では銀行券の種類を判別する方式として区分統合法を、銀行券の正否を判別する方式として透過平均色法を提案する。判別装置の光電計測系に第4章に述べた色分解受光モジュールを使用し、銀行券の色彩情報を高精度に検出することを生かした判別方式である。本章ではまず、それぞれの方式の具体的な考え方を示すとともに、実サンプルにより判別方式の有効性を実証する。次にこの銀行券判別方式を使用し、銀行券検査選別業務を自動化するための銀行券整理機の具体的な構成方法を述べる。

8. 2 色彩印刷物判別方式

8. 2. 1 色彩印刷物の特性

代表的な国の銀行券の形態を表8-1に示す。券の種類はアメリカDOLLAR券7種、イギリスPOUNDS券4種、ドミニカ PES00R0券8種など国により多少の差は有るが高々10種以内である。新旧銀行券が混在する状況を考えても券種は最大20種以内である。券種が人の目で区別しやすい様に図案や色調にはっきりした差を持たせたり、券サイズについても多少の差を持たせている場合が多い。

銀行券は製造段階で厳しい品質管理を行っているから色彩印刷物としての特性は非常に均一であるが、長年月の流通過程でさまざまな汚損、破損などが生じるため、一般の銀行券は雑音成分の非常に多い色彩画像となる。アメリカDOLLAR券を例に取り、流通銀行券の状況を図8-1、図8-2に示す。図8-1は銀行券の長さ分布例であり、折れ、しわ、自然伸縮などによって、3～5%の長さの変動が認められる。図8-2は汚れ、変色、破れなどによる損傷券の混入率を示す。損傷券の率は40～20%と高率である。銀行券の損傷状態はサンプル母集団によっても当然差が有るが、図8-1、図8-2は流通銀行券の典型的な状況を示している。

銀行券の判別方式はこの様な雑音成分に十分強い方式でなければならない。検査判別項目は大きく別けて次の三項目である。

- 1) 券種判別：銀行券の種類（アメリカDOLLAR券を例に取れば、1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 DOLLAR）を判別する。銀行券特有の雑音に強く、他券種への誤判別率が十分に低い信頼性の高い方式が必要である。
- 2) 排棄券判別：汚損・変色・破損などの損傷により、これ以上の流通使用に耐えない券と、再流通に耐える券との判別。銀行券の雑音成分を精度良く測定し、人間の視感判定と良く一致する判別方式が必要である。
- 3) 異常券判別：異国銀行券、偽造・変造券、かさなり券など、あらかじめ決めた基準で検査して適性でない銀行券を判別する。異常券を確実に判別するとともに、正常券を異常券に誤判別する率も十分小さい判別方式が望まれる。

以上三項目の判別内容の中で、排棄券判別と異常券判別は同じ判別方式を取るのもので、これを合わせて正否判別と呼ぶことにする。

表 8-1 代表的な国の銀行券

国	券 種	サイズ (mm×mm)	色 調	構図・デザイン
アメリカ	1 DOLLAR	156×66 全券種同一	白・黒中心 特定部分を除いて色彩なし。	全体的な構図は良く類似。 肖像など細部模様は異なる。
	2 "			
	5 "			
	10 "			
	20 "			
	50 "			
	100 "			
イギリス	1 POUND	151×71	券種により色調に差あり。	一部券種の構図は良く類似。 肖像は同じ。
	5 "	146×78		
	10 "	151×85		
	20 "	160×90		
オランダ	2・1/2 GULDEN	114×60	券種により明確な色調の差あり。	全体的な構図は良く類似。 細部模様は異なる。
	5 "	135×75		
	10 "	141×76		
	25 "	148×76		
	100 "	154×76		
	1000 "	159×76		
ドミニカ	1 PESOORO	155×66 全券種同一	券種により明確な色調の差あり。	全体的な構図、細部模様ともに異なる。
	5 "			
	10 "			
	20 "			
	50 "			
	100 "			
	500 "			
	1000 "			
ジブラルタル	1 POUND	134×66	券種により明確な色調の差あり。	全体的な構図、細部模様ともに同じ。
	5 "	145×77		
	10 "	150×85		
	20 "	160×89		
スワジランド	1 LILANGENI	149×68 全券種同一	券種により明確な色調の差あり。	全体的な構図は同じ。 肖像など細部模様もほとんど同じ。
	2 EMALANGENI			
	5 "			
	10 "			
	20 "			

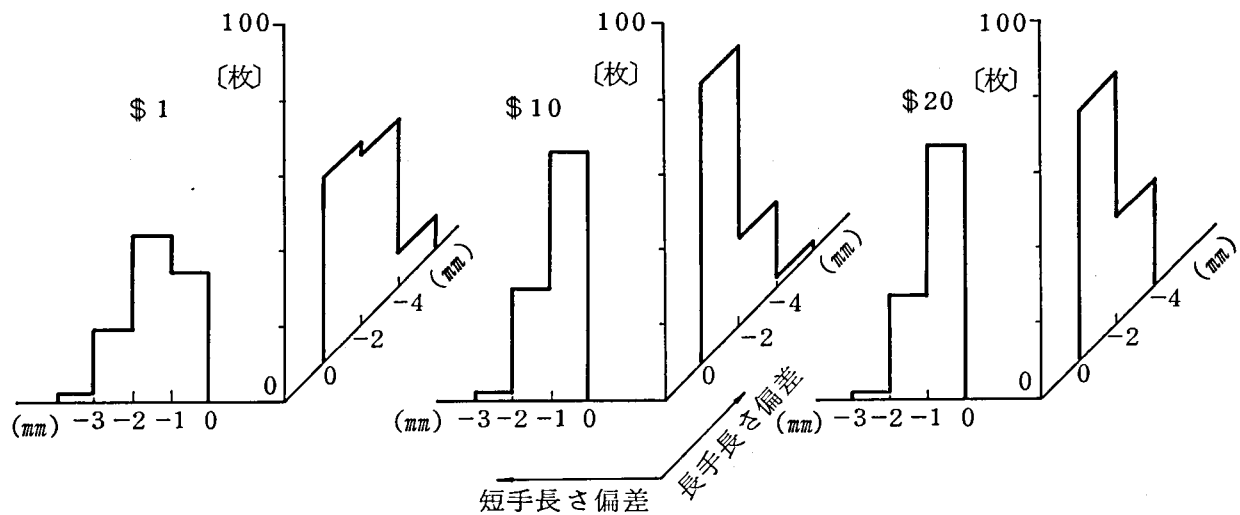


図 8 - 1 アメリカ DOLLAR 券における長さ偏差分布（一例）

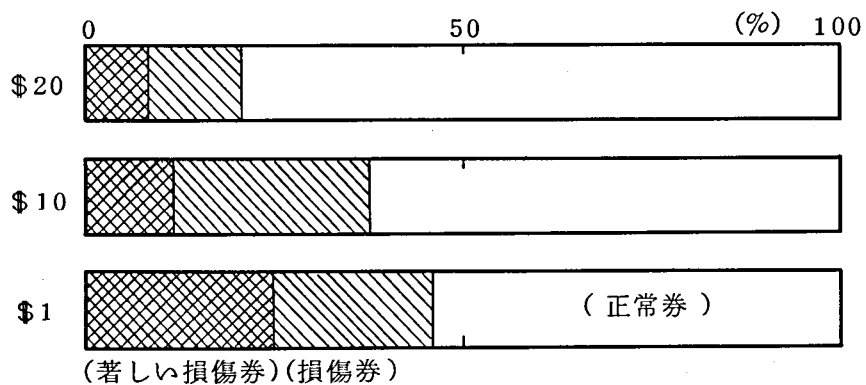


図 8 - 2 アメリカ DOLLAR 券における損傷券の状況（一例）

8. 2. 2 色彩印刷物の種類判別方法

A) 判別方式

色彩画像認識の基礎的研究がいくつか行なわれているが、これらは一般性に重点を置き大量の色彩画像情報を忠実に処理する方法⁷⁻²⁾を取っているため、装置規模や必要処理時間も大きく、銀行券判別に直接適用できる様な技術ではない。

ここでは雑音の多い色彩画像の高速種類判別方式として「区分統合法」を提案する。その考え方を図8-3、図8-4に示す。これは色彩画像 $Z(x, y)$ を N 個の領域 $Z_1 \sim Z_N$ に区分し、各区分領域ごとに基準画像との明度射影パターンの類似度 SY_i および平均色相の差 D_i を求めて銀行券の種類を判別する方法である。

以下 SY_i 、 D_i を求める手順を示す。第 i 番目区分領域の色彩画像に対し、 R 、 G 、 B 成分ごとの x 軸方向の射影信号を次式で定義する。

$$\begin{aligned} W_{Ri}(y_j) &= \sum_{k=1}^{M_x} Z_{Ri}(x_k, y_j) / M_x \\ W_{Gi}(y_j) &= \sum_{k=1}^{M_x} Z_{Gi}(x_k, y_j) / M_x \\ W_{Bi}(y_j) &= \sum_{k=1}^{M_x} Z_{Bi}(x_k, y_j) / M_x \end{aligned} \quad \dots (8-1)$$

ただし、 $Z_{Ri}(x, y)$ 、 $Z_{Gi}(x, y)$ 、 $Z_{Bi}(x, y)$ ：第 i 番目区分領域の色彩画像 $Z_i(x, y)$ の R 、 G 、 B 成分

$W_{Ri}(y_j)$ 、 $W_{Gi}(y_j)$ 、 $W_{Bi}(y_j)$ ：射影出力

$k = 1 \dots M_x$ 、 M_x ： x 軸方向の画素数

$j = 1 \dots M_y$ 、 M_y ： y 軸方向の画素数

第 i 番目区分領域の平均色 R_i 、 G_i 、 B_i は式(8-1)の結果から次式で求まる。

$$\begin{aligned} R_i &= \sum_{j=1}^{M_y} W_{Ri}(y_j) / M_y \\ G_i &= \sum_{j=1}^{M_y} W_{Gi}(y_j) / M_y \end{aligned} \quad \dots (8-2)$$

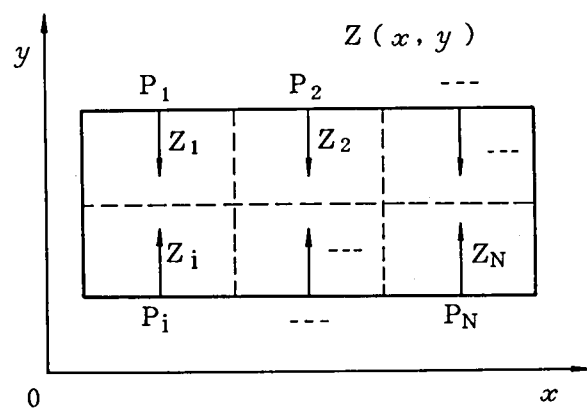


図 8 - 3 色彩画像 $Z(x, y)$ の区分例

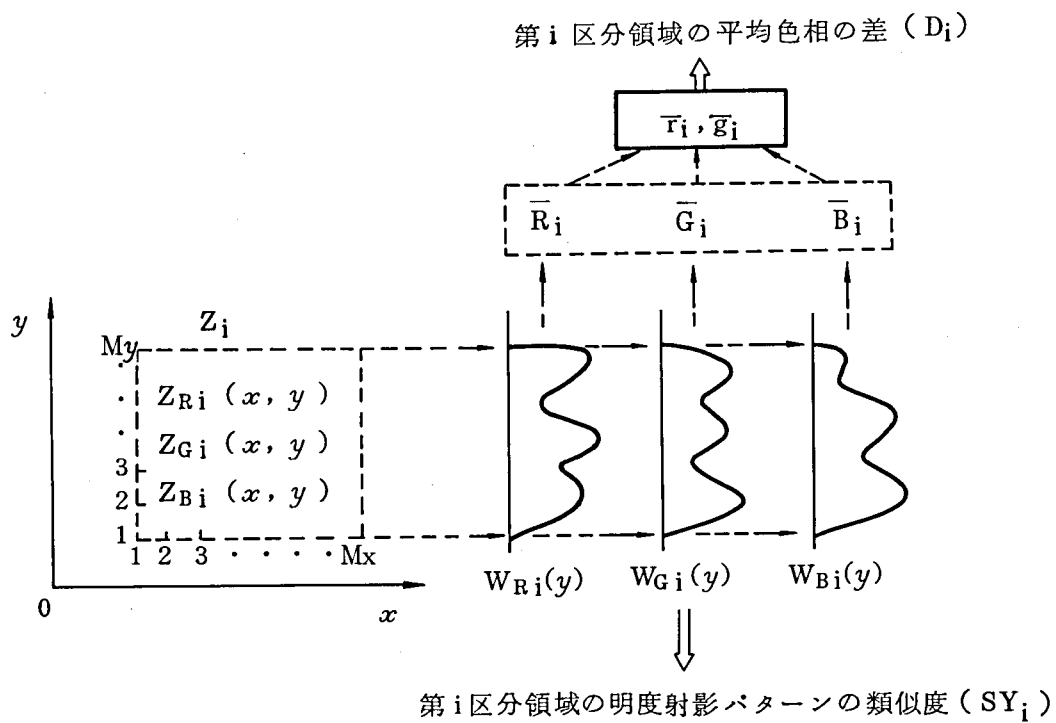


図 8 - 4 区分統合法のデータ処理内容を示す図

$$B_i = \sum_{j=1}^{My} W_{Bi}(y_j) / M_y$$

以上式(8-1), 式(8-2)で定まる値をもとに明度射影パターン($Y_i(j)$; $j = 1 \dots M$)及び平均色相 \bar{r}_i , \bar{g}_i を次の様に定義する。

$$Y_i(j) = W_{Gi}(y_j), \quad j = 1 \dots M \quad \dots (8-3)$$

$$\bar{r}_i = R_i / (R_i + G_i + B_i)$$

$$\bar{g}_i = G_i / (R_i + G_i + B_i) \quad \dots (8-4)$$

明度射影パターン $Y_i(j)$ は第*i*番目区分領域色彩画像の射影信号の中でG成分の射影信号 $W_{Gi}(y)$ をM点サンプリングして得られるベクトル、平均色相 \bar{r}_i , \bar{g}_i は第*i*番目区分領域の色相平均値を表わす。

以上の明度射影パターン、平均色相をもとに各区分領域ごとに起点 P_i (図8-3参照)で位置合わせを行ない、基準色彩画像に対する類似度 SY_i 及び色相差 D_i を求める。基準色彩画像(銀行券)がL種類有る場合、第*k*種類目($k = 1 \dots L$)の基準色彩画像の第*i*区分領域の画像に対する類似度及び色相差は次式で定まる。

$$SY_i(k) = \sum_{j=1}^M Y_i(j) \cdot YO_i(k, j) / \left\{ \sum_{j=1}^M Y_i(j)^2 \right\}^{1/2} \cdot \left\{ \sum_{j=1}^M YO_i(k, j)^2 \right\}^{1/2} \quad \dots (8-5)$$

$$D_i(k) = \left[\{ \bar{r}_i - \bar{r}_{oi}(k) \}^2 + \{ \bar{g}_i - \bar{g}_{oi}(k) \}^2 \right]^{1/2} \times 100 \quad \dots (8-6)$$

ただし、 $SY_i(k)$: 第*k*種類目基準色彩画像の第*i*区分領域に対する明度射影パターンの類似度

$D_i(k)$: 第*k*種類目基準色彩画像の第*i*区分領域に対する平均色相の差

$YO_i(k, j)$: 第*k*種類目基準色彩画像の第*i*区分領域の明度射影パターン
 $j = 1 \dots M$

$\bar{r}_{oi}(k)$, $\bar{g}_{oi}(k)$: 第*k*種類目基準色彩画像の第*i*区分領域の平均色相

以上のように求まる第*i*区分領域の明度射影パターンの類似度(以下単に類似度と呼ぶ)および平均色相の差(以下単に色相差と呼ぶ)から、対象色彩画像全体の類似度 $SY_0(k)$ および色相差 $D_0(k)$ を次式のように単純平均で定義する。

$$SY_0(k) = \sum_{i=1}^N SY_i(k) / N, \quad k=1 \dots L \quad \dots (8-7)$$

$$D_0(k) = \sum_{i=1}^N D_i(k) / N, \quad k=1 \dots L \quad \dots (8-8)$$

L種類のカテゴリの中で $SY_0(k)$ が最大となり、 $D_0(k)$ が最小となるカテゴリが判別カテゴリとなる。式(8-7)、式(8-8)で求まる類似度 SY_0 および色相差 D_0 は区分領域ごとに色彩画像の位置合わせを行うから、折れやしわ、伸縮など色彩画像の歪の影響を受けにくい。また明度射影信号を使用しているため形状情報はデータ量が $M/3$ ($M_x \times M_y$)に圧縮され、平均色相に注目することにより色彩情報は $2/3$

($M_x \times M_y$)に圧縮されている。したがって色分解画像($Z_R(x, y)$, $Z_G(x, y)$, $Z_B(x, y)$)をそのまま類似度計算する場合と比較して大幅な高速判別が可能である。

B) 実サンプルによる確認実験

アメリカDOLLAR券を具体例にし、図8-5に示す様に区分領域を2 ($N=2$)とした場合と、領域を区分せず類似度を求めた場合の結果を比較して表8-2に示す。この表は1 DOLLAR券自身の類似度を示す。したがって類似度平均値($SY_0(n, n)$)はできるだけ1.0に近く、類似度分散値($\sigma_{n,n}$)はできるだけ0.0に近い事が、高性能に券種判別を行うために好ましい。表8-2の結果は区分統合により色彩印刷物の歪の影響が効果的に除去される事を表わしている。

アメリカDOLLAR券7券種を対象にし、区分領域を2とした場合の類似度値 $SY_1(k)$, $SY_2(k)$, $SY_0(k)$ を表8-3, 表8-4, 表8-5に示す。この表における類似度値は各券種ごと100枚のサンプル(\$1~\$100, 各券種ごとに無作為で抽出したサンプル券)で求まる類似度値の平均値を示している。基準となる明度射影パターン $YO_j(k, j)$ は標準的な銀行券10枚を選定し、その平均値として設定している。類似度値を求めるに当り、直流成分を除去し、交流成分の類似度値を求めているため、券種間では類似度値が負の値となる場合も有る。同一券種の中でも銀行券の状態や券の搬送状態により類似度値にばらつきが表われる。表8-5の統合化した類似度値(SY_0)に対しては100枚サンプルで表われた類似度値のばらつき($\pm 3\sigma$)の範囲も示した。

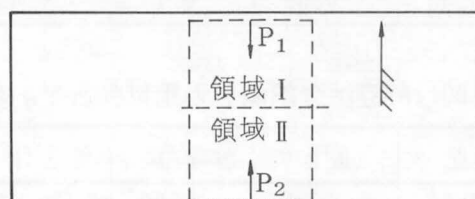


図 8 - 5 区分統合法をアメリカ DOLLAR 券に適用した場合の領域区分例

表 8 - 2 区分統合法による類似度値と通常類似度値の比較表 (一例)

	類似度値の 平均値 $\bar{S}_{1,1}$	類似度値の 分散 $\sigma_{1,1}$
区分統合法 (N=2)	0.93	0.016
通常類似度法	0.89	0.028

(サンプル：アメリカ 1 DOLLAR 券 100 枚)

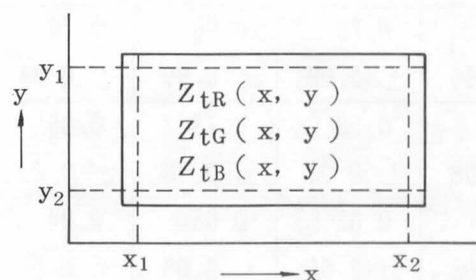


図 8 - 6 色彩印刷物における平均値の測定範囲例

表 8-3 アメリカDOLLAR券区分領域1の類似度 $SY_1(k)$ マトリックス

	\$ 1	\$ 2	\$ 5	\$ 10	\$ 20	\$ 50	\$ 100
\$ 1	0.96	0.16	0.74	0.66	0.35	0.04	0.91
\$ 2	0.16	0.97	0.14	-0.06	-0.29	0.73	0.09
\$ 5	0.74	0.14	0.96	0.92	0.59	-0.10	0.69
\$ 10	0.66	-0.06	0.92	0.97	0.70	0.09	0.71
\$ 20	0.35	-0.29	0.59	0.70	0.94	-0.12	0.48
\$ 50	0.04	0.73	-0.10	0.09	-0.12	0.94	0.25
\$ 100	0.91	0.09	0.69	0.71	0.48	0.25	0.96

表 8-4 アメリカDOLLAR券区分領域2の類似度 $SY_2(k)$ マトリックス

	\$ 1	\$ 2	\$ 5	\$ 10	\$ 20	\$ 50	\$ 100
\$ 1	0.92	0.63	0.33	0.30	0.11	0.12	0.54
\$ 2	0.63	0.92	0.48	0.47	0.45	0.44	0.45
\$ 5	0.33	0.48	0.92	0.59	0.76	0.13	0.53
\$ 10	0.30	0.47	0.59	0.96	0.85	0.07	0.50
\$ 20	0.11	0.45	0.76	0.85	0.96	0.20	0.51
\$ 50	0.12	0.44	0.13	0.07	0.20	0.94	0.48
\$ 100	0.54	0.45	0.53	0.50	0.51	0.48	0.93

表 8-5 アメリカDOLLAR券の区分統合法による類似度 $SY_0(k)$ マトリックス

	\$ 1	\$ 2	\$ 5	\$ 10	\$ 20	\$ 50	\$ 100
\$ 1	0.93 ± 0.05	0.40 ± 0.08	0.54 ± 0.08	0.48 ± 0.08	0.23 ± 0.08	0.08 ± 0.08	0.73 ± 0.08
\$ 2	0.40 ± 0.08	0.95 ± 0.05	0.31 ± 0.08	0.21 ± 0.08	0.08 ± 0.08	0.59 ± 0.08	0.27 ± 0.08
\$ 5	0.54 ± 0.08	0.31 ± 0.08	0.93 ± 0.05	0.76 ± 0.08	0.68 ± 0.08	0.02 ± 0.08	0.61 ± 0.08
\$ 10	0.48 ± 0.08	0.21 ± 0.08	0.76 ± 0.08	0.96 ± 0.05	0.78 ± 0.08	0.08 ± 0.08	0.61 ± 0.08
\$ 20	0.23 ± 0.08	0.08 ± 0.08	0.68 ± 0.08	0.78 ± 0.08	0.95 ± 0.05	0.04 ± 0.08	0.50 ± 0.08
\$ 50	0.08 ± 0.08	0.59 ± 0.08	0.02 ± 0.08	0.08 ± 0.08	0.04 ± 0.08	0.94 ± 0.05	0.37 ± 0.08
\$ 100	0.73 ± 0.08	0.27 ± 0.08	0.61 ± 0.08	0.61 ± 0.08	0.50 ± 0.08	0.37 ± 0.08	0.94 ± 0.05

アメリカDOLLAR券は全券種とも白・黒中心の同一色調の印刷であり、したがって券種間の色相差は有意差が表われないから、具体的な数値は示さない。しかしながら表8-5の結果を見ると、類似度値の判別いき値 $SS = 0.87$ に設定することにより、区分統合法の明度射影パターンの類似度のみでアメリカDOLLAR券の券種判別が可能であることがわかる。

他の典型的な例に対し、図8-5に示すように券の中央部を二つの領域に分け区分統合法を適用した場合の結果を表8-6、表8-7に示す。表8-6はスワジランドEMALANGENI券に適用した場合の色相差 $D_0(k)$ マトリックスを示す。この券では表8-1に示す様に券サイズ及び基本的構図が同一であるため類似度には有意差が表われない。しかしこの場合には表8-6からわかるように色相差マトリックスから5種類の券種の相互識別が可能である。

表8-7はジブラルタルPOUND 券に適用した場合の色相差マトリックスと類似度マトリックスを示す。色相差だけでは1Pと20Pの判別が不可能であり他方類似度だけでは10Pと20Pの判別が不可能であるが、両者を統合した情報により確実な券種判別が可能である。(表8-6、表8-7においてはサンプル数が不足していたため、ばらつき量はアメリカDOLLAR券に見られる量を推定値として使用している。) アメリカDOLLAR券とスワジランドEMALANGENI券は両極端の代表的な例であり、大部分の国の銀行券はジブラルタルPOUND 券のように類似度と色相差が相互に有効に働き合う色彩印刷物である。以上の典型的な適用結果から見て、ここに述べる区分統合法が汎用性の有る効果的な色彩印刷物の種類判別方式であると言える。

8. 2. 3 色彩印刷物の正否判別方法

色彩画像の色を画素単位に識別する方法として最尤度法⁸⁻⁵⁾を応用する方法があり、これは色彩図案の色分離装置として実用にも供されている。しかし画素単位の色識別の場合、得られる光電信号の S/N に限界があり小色差の色の識別は困難である。

排棄銀行券の80~90%は全体的な汚損・変色によるものであるが、判別限界域になればその測色的な差は非常にわずかである。したがって銀行券の広い面積にわたって平均色、特に透過光の平均色を高精度に測定する事が排棄券判別のために重要である。

異常銀行券については紙質や印刷模様の色調の差が判別の手かがりになる事が多いが、この場合にも局所的な色調の差よりも全体的な平均的な色調に注目する方が測色精度の面で好結果が期待できる。ここでは銀行券正否判別の一方法として銀行券全域あるいは全域に

表 8-6 スワジランドEMALANGENI券における区分統合法
による色相差 D_0 (k)マトリックス

	1 LILANGENI	2 EMALANGENI	5 EMALANGENI	10 EMALANGENI	20 EMALANGENI
1 E	1.5± 1.5	21.6± 1.5	26.7± 1.5	25.8± 1.5	8.2± 1.5
2 E	21.6± 1.5	1.5± 1.5	5.4± 1.5	6.9± 1.5	14.1± 1.5
5 E	26.7± 1.5	5.4± 1.5	1.5± 1.5	7.9± 1.5	19.4± 1.5
10 E	25.8± 1.5	6.9± 1.5	7.9± 1.5	1.5± 1.5	17.7± 1.5
20 E	8.2± 1.5	14.1± 1.5	19.4± 1.5	17.7± 1.5	1.5± 1.5

表 8-7 ジブラルタル POUND 券における区分統合法
による, [I] 色相差 D_0 (k)マトリックス
[II] 類似度 SY_0 (k)マトリックス

	1 POUND	5 POUNDS	10 POUNDS	20 POUNDS
1 P	1.5± 1.5	20.8± 1.5	21.1± 1.5	3.4± 1.5
5 P	20.8± 1.5	1.5± 1.5	8.8± 1.5	19.6± 1.5
10 P	21.1± 1.5	8.8± 1.5	1.5± 1.5	21.4± 1.5
20 P	3.4± 1.5	19.6± 1.5	21.4± 1.5	1.5± 1.5

[I]

	1 POUND	5 POUNDS	10 POUNDS	20 POUNDS
1 P	0.93 ± 0.05	0.76 ± 0.08	0.53 ± 0.08	0.41 ± 0.08
5 P	0.76 ± 0.08	0.93 ± 0.05	0.67 ± 0.08	0.72 ± 0.08
10 P	0.53 ± 0.08	0.67 ± 0.08	0.93 ± 0.05	0.84 ± 0.08
20 P	0.41 ± 0.08	0.72 ± 0.08	0.84 ± 0.08	0.93 ± 0.05

[II]

近い広い領域の透過平均色を測定し判別する方法（ここでは透過平均色法と呼ぶ）を提案する。

銀行券を構成する透過色彩画像 $Z_t(x, y)$ に対し、図8-6の様に対象領域を $x_1 \sim x_2, y_1 \sim y_2$ とする時、透過平均色 R_t, G_t, B_t は

$$\begin{aligned} R_t &= \sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} Z_{t_R}(x, y) \\ G_t &= \sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} Z_{t_G}(x, y) \\ B_t &= \sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} Z_{t_B}(x, y) \end{aligned} \quad \dots (8-9)$$

以上の R_t, G_t, B_t より平均測色値を次の様に定義する。

$$\bar{V}_t = k \bar{G}_t, \quad k: \text{係数} \quad \dots (8-10)$$

$$\bar{r}_t = R_t / (R_t + G_t + B_t), \quad \bar{g}_t = G_t / (R_t + G_t + B_t)$$

無作為抽出した 900枚の正常銀行券（同一券種）と 100枚の排棄券について、上記平均測色値を求め、そのヒストグラムを示すと図8-7である。図においてヒストグラムの斜線部分は排棄券の分布を示す。判別いき値 S_L を決め、いき値以上（あるいは以下）を排棄券に判別する事により、視感判別結果に非常に近い排棄券判別が可能であると言える。

排棄券も含む正常銀行券の平均測色値は正規分布に近い形で分布するから、この許容上下限值に納まらない銀行券は異常銀行券と判定することができる。局所的な測色値はばらつきも多く検出信号の S/N も悪いため、わずかな色調の差による判別が困難であるが、広い領域の平均測色値は精度の良い測色が可能であるから、印刷の色調や紙質などのわずかな差による異常券判別が可能となる。

8. 2. 4 正否判別いき値の自動設定・自動修正

銀行券正否判別のための平均測色値は統計的分布を示すから、排棄券判別、異常券判別いずれの場合も判別いき値の設定が判別性能に大きくかわる。

銀行券整理機では①判別レベル設定モード、②通常運転モードの二つの運転モードを設け、①では判別レベルの自動設定機能、②では判別レベル自動修正機能を設ける事により高い精度の判別が可能となった。

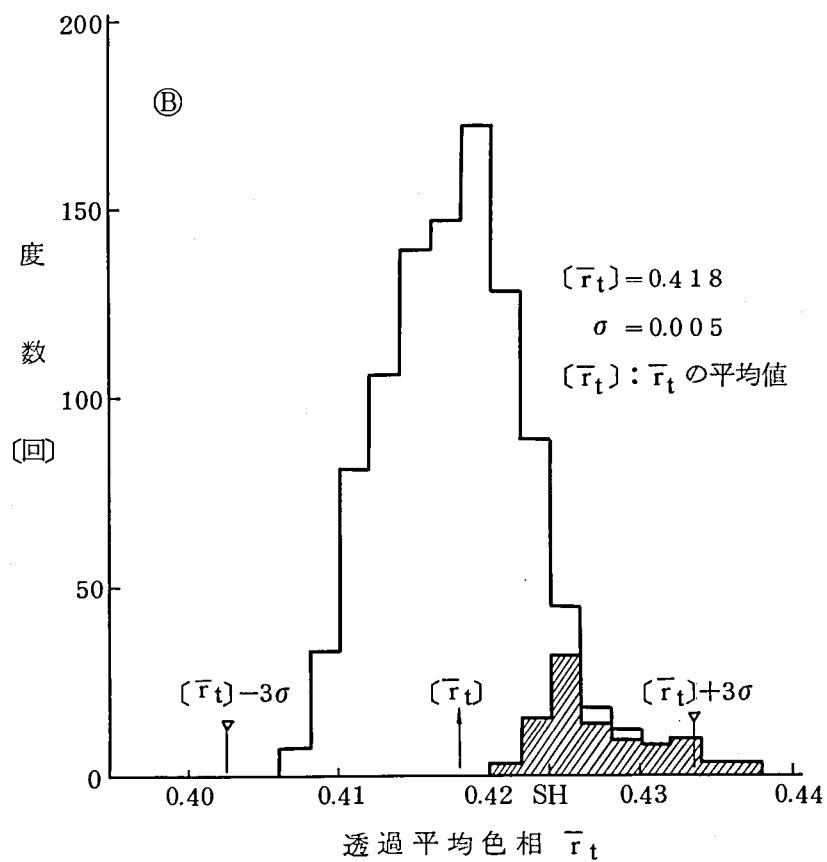
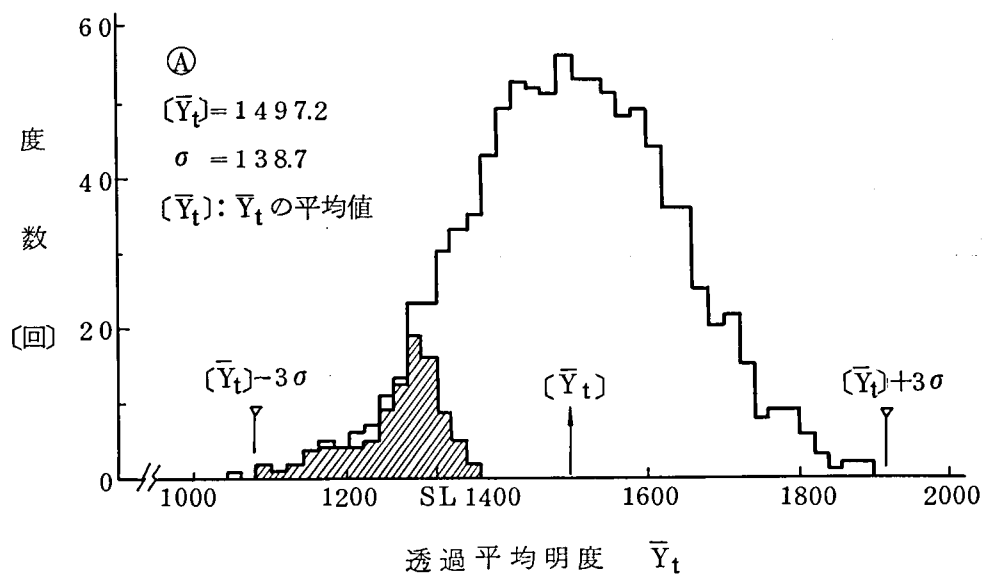


図 8 - 7 代表的な銀行券サンプルによる, ①透過平均明度ヒストグラム, ②透過平均色相ヒストグラムの例

A) 判別レベルの自動設定

統計的特性を求めるのに十分なN枚の無作為抽出の銀行券サンプル（実的には1000枚程度）を順次銀行券整理機に通し、n番目銀行券から得られる第i番目検出量を X_{in} とする。N枚の銀行券について、単純和 $\sum X_{in}$ 及び二乗和 $\sum (X_{in})^2$ を求める。この時、N枚の紙幣による検出量の平均値 \bar{X}_i 及び標準偏差 σ_i は次式から求まる。

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{n=1}^N X_{in}}{N} \quad , \quad i=1 \sim I \quad , \quad I: \text{検出量の項目数}$$
$$\sigma_i = \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N (X_{in})^2}{N} - \bar{X}_i^2 \right\}^{1/2} \quad \dots (8-11)$$

以上の統計値 \bar{X}_i 、 σ_i から、判別下限いき値 l_i 及び上限いき値 h_i を次の様に定める。

$$l_i = \bar{X}_i - n_i \cdot \sigma_i \quad , \quad h_i = \bar{X}_i + m_i \cdot \sigma_i \quad \dots (8-12)$$

この統計量計算と判別レベル計算を実時間で実施すれば、N枚の銀行券サンプルを装置に通し終った時点で判別いき値が自動的に設定される。代表的な銀行券サンプル1000枚における検出量 X_1 のヒストグラムを図8-8に示す。 $l_1 = \bar{X}_1 - 4.0\sigma_1$ 、 $h_1 = \bar{X}_1 + 4.0\sigma_1$ とした時の判別いき値を図中に示してあるが、この場合1000枚のサンプル銀行券はすべて上・下限判別いき値内に入り、余分ないき値領域も非常に少ない。これに対して任意抽出した1枚の銀行券の検出値 X_a をもとにして、一定のばらつきを考慮して $\pm \Delta X$ の幅を加味した判別いき値は余分な領域を多く含んでいる。

B) 判別レベルの自動修正

銀行券整理機の光電検出部へのほこりや汚れの付着、あるいは照明光源や受光器系の経時変動により検出値に変動が起るが、これは判別いき値が最適でなくなる事を意味し、リジェクト率の増加、誤判別率の増加に直結する。銀行券整理機では同一券種をまとめて処理する、すなわち、ある時間帯について見ると特定の券種（たとえば10ドル券）のみを処理するから、処理対象の銀行券検出値の統計値をダイナミックに計測すれば、これら統計値の変動から装置パラメータの変動が推定でき、判別いき値の自動修正が可能となる。

通常運転モードにおいて、順次処理される銀行券の検出量 X_{in} の単純和 $\sum X_{in}$ を求める。この場合、個々の銀行券に対しては正・否の判定がなされているから、否と判定されたものは上記単純和から除外する。M枚の銀行券（実的には1000枚～10000枚）が処理し終

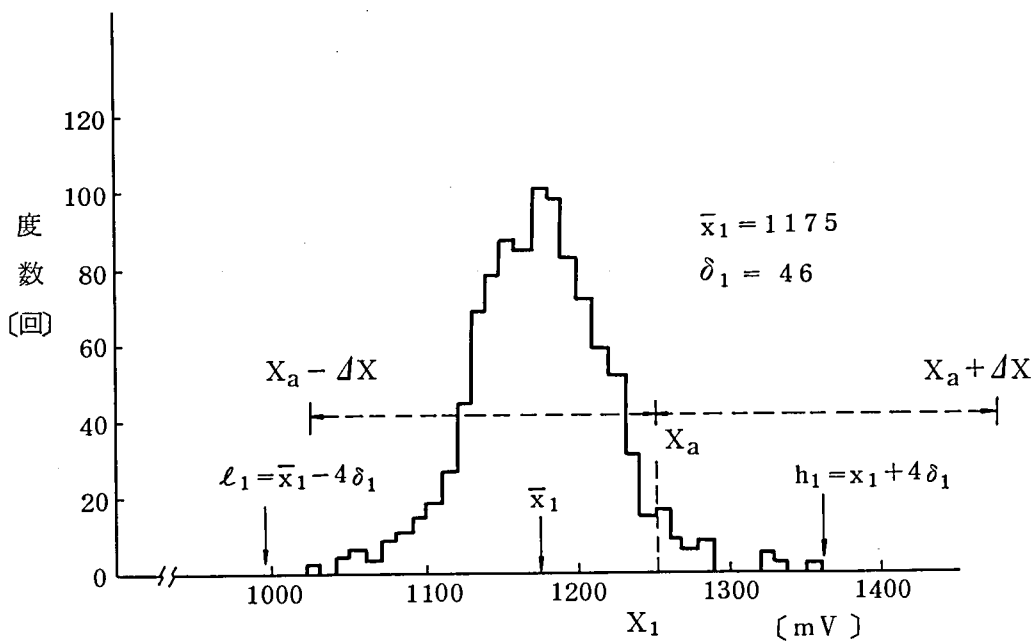


図 8 - 8 代表的な検出量 (X_1) のヒストグラム例と判別いき値 (l_1, h_1) の設定例。

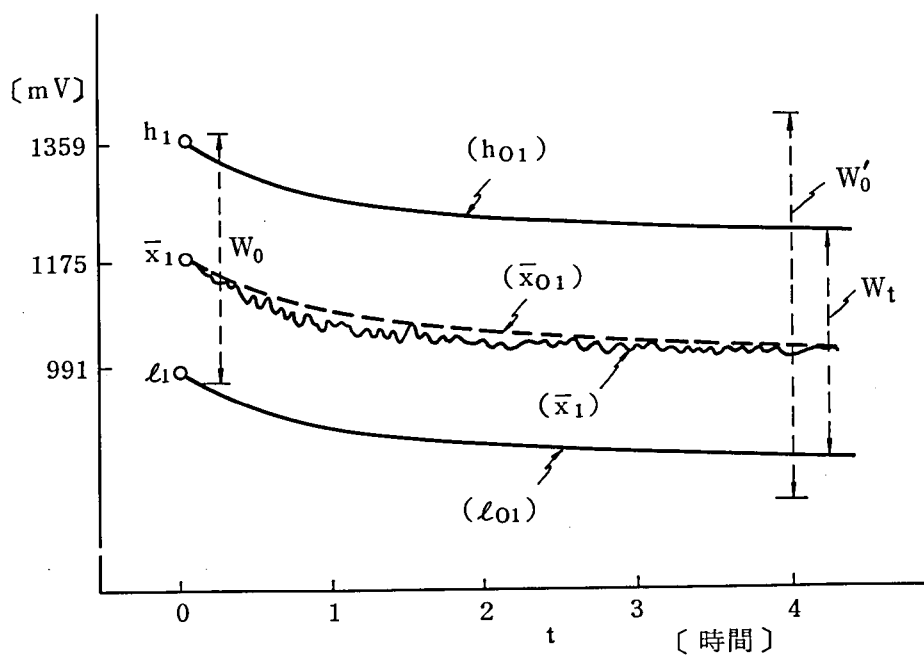


図 8 - 9 判別いき値の自動修正推移例

った時点で平均値 \bar{x}_i が求まる。

$$\bar{x}_i = \sum_{m=1}^M x_{im} / M \quad (8-13)$$

サンプル数 M が十分大きければ平均値 \bar{x}_i は銀行券個有の値になる。平均値に変動が表われたとすれば測定系の変動が原因である。この平均値とすでに記憶している過去の平均値 \bar{x}_{0i} とを比較し、その差がある一定値より大きい場合には、次式により判別いき値を変更する。

$$\begin{aligned} q_i &= q_{0i} + (\bar{x}_i - \bar{x}_{0i}) / d \\ h_i &= h_{0i} + (\bar{x}_i - \bar{x}_{0i}) / d \quad i = 1 \sim I \end{aligned} \quad \dots (8-14)$$

ただし、 q_{0i}, h_{0i} : 修正前の古い判別いき値

q_i, h_i : 新しい判別いき値

記憶している平均値については次式により修正平均値を求める。

$$\bar{x}'_{0i} = \bar{x}_{0i} + (\bar{x}_i - \bar{x}_{0i}) / d \quad \dots (8-15)$$

ただし、 \bar{x}_{0i} : 修正前の古い平均値

\bar{x}'_{0i} : 新しい平均値

d : ダンピング・ファクター ($d = 5 \sim 10$)

判別いき値自動修正処理による判別いき値の経時変動例を図 8-9 に示す。

8.3 色彩印刷物検査選別装置の構成

8.3.1 装置の概要と機能^{8-1), 8-3)}

図 8-10 に銀行券整理機 (CA-410 型) の外観を示す。この銀行券整理機は外国の金融機関向けに開発した装置であり、銀行券サイズ、印刷模様など多様な銀行券の自動検査判別整理を可能とした汎用性の高い装置である。銀行券の処理の流れを図 8-11 に示す。供給ユニットに千枚単位で一括供給される銀行券をフィーダにより一枚ずつ取り出し、搬送ユニットにより一定速度で搬送し、検知ユニット、 DU_1, DU_2, DU_3, DU_4 を通過する間に銀行券の種類判別、排棄券判別、異常券判別を行う。判別結果にもとづきそれぞれ正券スタッカー、排棄券スタッカー、及びリジェクト・スタッカーに整列集積される。正券スタッカーと排棄券スタッカーに集積された銀行券は 100 枚単位で自動的に紙帯により施封がほどこされ、必要なスタンプが押印されて機外に搬出される。

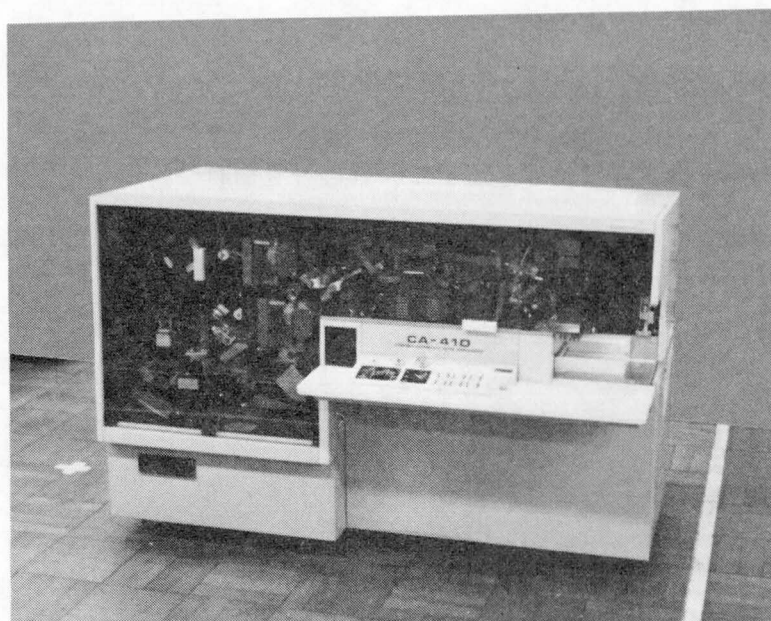


図 8 - 10 銀行券整理機 (CA - 410 型) の外観図

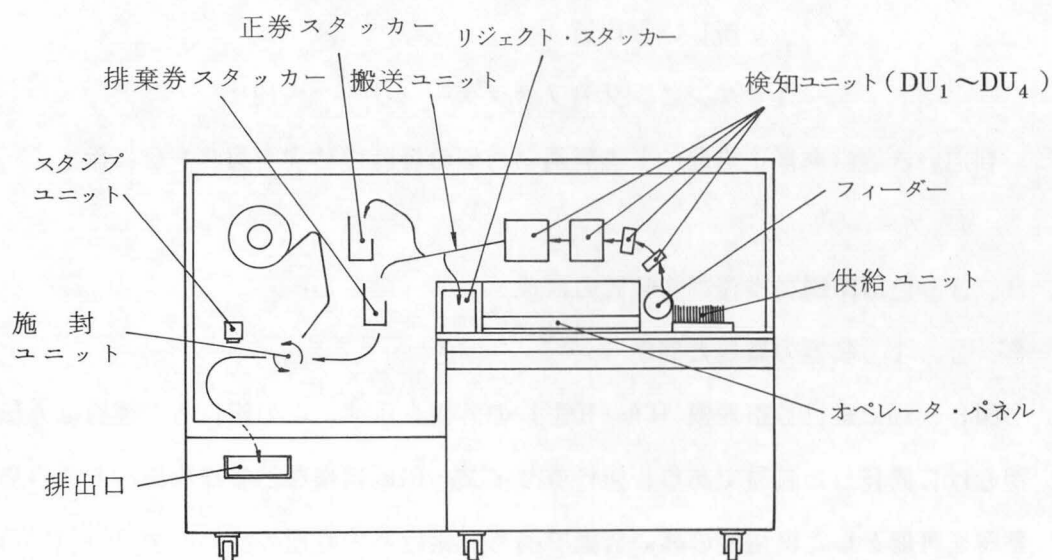


図 8 - 11 銀行券整理機の構成と
銀行券処理の流れを示す図。

銀行券は10枚／秒の速度で取り出され、10m/sec の速度で搬送されるが、この速度に十分追従できる判別方式が必要である。判別項目は券種判別、排棄券判別、異常券判別であり、検知ユニット、 DU_1 、 DU_2 、 DU_3 、 DU_4 に種々のセンサーを備え色々の角度から正否判別を行っている。本論文では色彩画像計測を応用した判別内容についてのみ述べ、他の技術による判別内容（たとえば厚みセンサーによる厚み異常の判別など）については省略する。色彩画像計測を応用した判別項目は、

a) 色彩印刷パターンに注目した券種判別（区分統合法）

b) 銀行券の広い部分の平均測色値に注目した排棄券判別及び異常券判別（透過平均色法）である。

8. 3. 2 光電系の構成と検出信号の正規化

券種判別及び正否判別のための光電ユニットは図8-11に示した4個の検知ユニットの内の一つを充当している。その光電系の構成を図8-12に示す。銀行券はベルトに把持され矢印の方向に定速で搬送される。 DM_T は銀行券の透過光を受光する色分解受光モジュール（MDモジュール）であり、その受光視野は図8-12（B）の（T）である。銀行券の定速搬送を利用し、検出信号を時間軸に積分する事により正否判別のための平均色を測定する。 DM_R は銀行券の反射光を受光するMDモジュールであり、その受光視野は図8-12（B）の（R）である。受光視野はx軸方向の横長の視野であるから、MDモジュール DM_R の出力信号は銀行券画像をx軸方向に射影した信号となる。銀行券搬送に伴って得られる時系列信号を一定間隔でサンプリングすれば、式（8-1）で示される射影信号 $W_{Ri}(y)$ 、 $W_{Gi}(y)$ 、 $W_{Bi}(y)$ と等価な信号が得られる。この信号を後続の券種判別処理回路に送る。

MDモジュールの具体的設計方法や特性は第4章に詳しく示した。MDモジュールは高い受光効率が得られるから、検出信号そのもののS/N値を必要十分に高く取ること（60dB以上）は比較的容易である。しかし照明光源の光度変動が数[%]～10[%]は起り得る。さらに測色対象物の搬送を利用して広い面積の平均色を測定するような場合、搬送速度の変動が測色誤差につながる。高精度な測色を行なうためには、これらの変動要因を除去した検出信号の正規化が不可欠である。これに対しては、図8-12（A）に示す様に測色物体の搬送路上に光電スイッチ PS_1 、 PS_2 、 PS_3 、 PS_4 を配置し、走行する測色対象物の端部を検知するように光電測色系を構成すれば、照明系の変動と搬送系の変動の両者

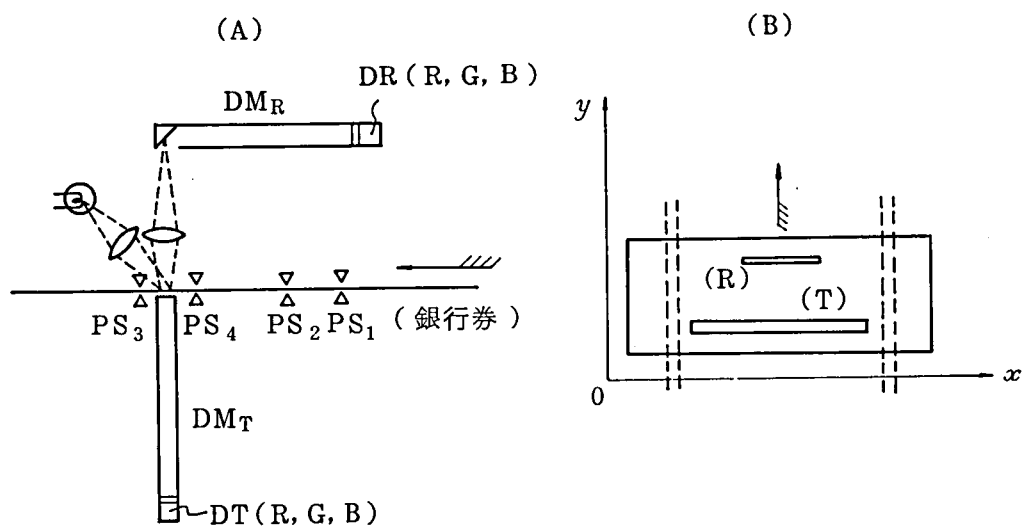


図 8 - 12 (A) 券種判別，正否判別のための光電系の構成図
(B) 色分解受光モジュールの受光視野を示す図

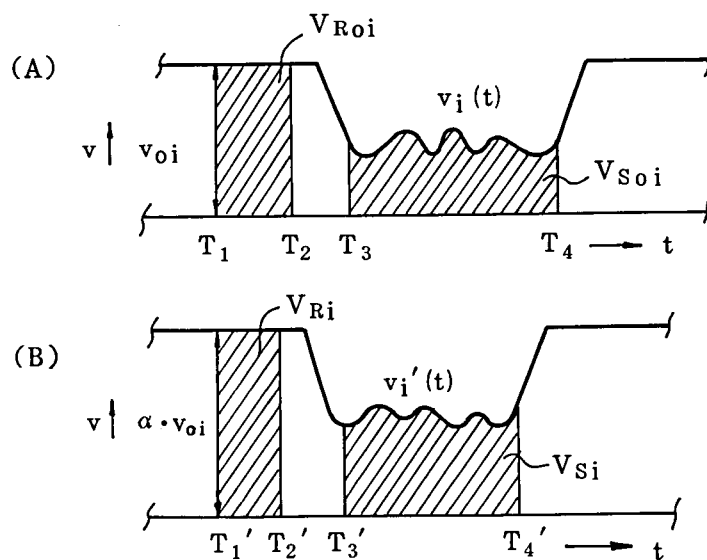


図 8 - 13 ダイナミック正規化の動作説明図

の影響を同時に除去できるダイナミックな正規化（ここではダイナミック正規化と呼ぶ）が可能である。

ダイナミック正規化の基本的な考え方を図8-13に示す。図8-13(A)はある基準となる状態での第*i*番目受光器の出力波形 $v_i(t)$ であり、MDモジュール受光視野内に測色対象物がなく、基準光 ϕ_R を受けた時の出力を v_{oi} とする。 T_1 、 T_2 、 T_3 は搬送される測色対象物の先端が光電スイッチ PS_1 、 PS_2 、 PS_3 を通過する時刻であり、 T_4 は測色対象物の後端が PS_4 を通過する時刻を表わす。以上の基準状態に対し照明系の変動が起り検出信号が α 倍になり、また搬送系に変動が起り搬送速度が $1/\beta$ 倍になった場合（ただしこれらの変動の時定数は比較的大きく、 $T_1 \sim T_4$ の時間区間での変動は無いものとする）の出力信号波形を図8-13(B)に示すように $v'_i(t)$ とする。基準状態と変動状態に対して受光視野内に測色対象物が無い間（ $T_1 \sim T_2$ ）の信号積分出力を V_{Roi} 、 V_{Ri} とし、測色対象物からの透過光あるいは反射光を受光している間（ $T_3 \sim T_4$ ）の信号積分出力を V_{soi} 、 V_{si} とすれば、

$$V_{Ri} = \int_{T1'}^{T2'} v_i(t) dt = \int_{\beta T1}^{\beta T2} \alpha \cdot v_i(t') dt' = \alpha \cdot \beta V_{Roi} \quad \dots (8-16)$$

$$V_{si} = \int_{T3'}^{T4'} v_i(t) dt = \int_{\beta T3}^{\beta T4} \alpha \cdot v_i(t') dt' = \alpha \cdot \beta V_{soi} \quad \dots (8-17)$$

である。したがって

$$\begin{aligned} W_i &= K(V_{si}) / (V_{Ri}) = K(\alpha \beta V_{soi}) / (\alpha \beta V_{Roi}) \\ &= K(V_{soi}) / (V_{Roi}) \quad \dots (8-18) \end{aligned}$$

K : 比例係数

で定まる検出信号 W_i に注目すれば、 W_i は照明系の変動（ α ）と搬送系の変動（ β ）の影響を除去した測定量となり、精度の高い測色が可能である。

8.3.3 信号処理系の構成

自動化・省力化目的の装置では処理速度が重要である。銀行券整理機では毎秒10枚以上の処理能力を実現するため、判別処理装置の主要部分は専用ハードウェアで構成した。図8-14に区分統合法による色彩印刷物判別処理系を示す。類似度計算部、平均色相計算部までを専用回路で構成し、ここで各区分領域ごとの明度パターン類似度と平均色相を求める。各区分領域での色差、及び類似度値と色差値の統合による判別処理は後続のマイクロ

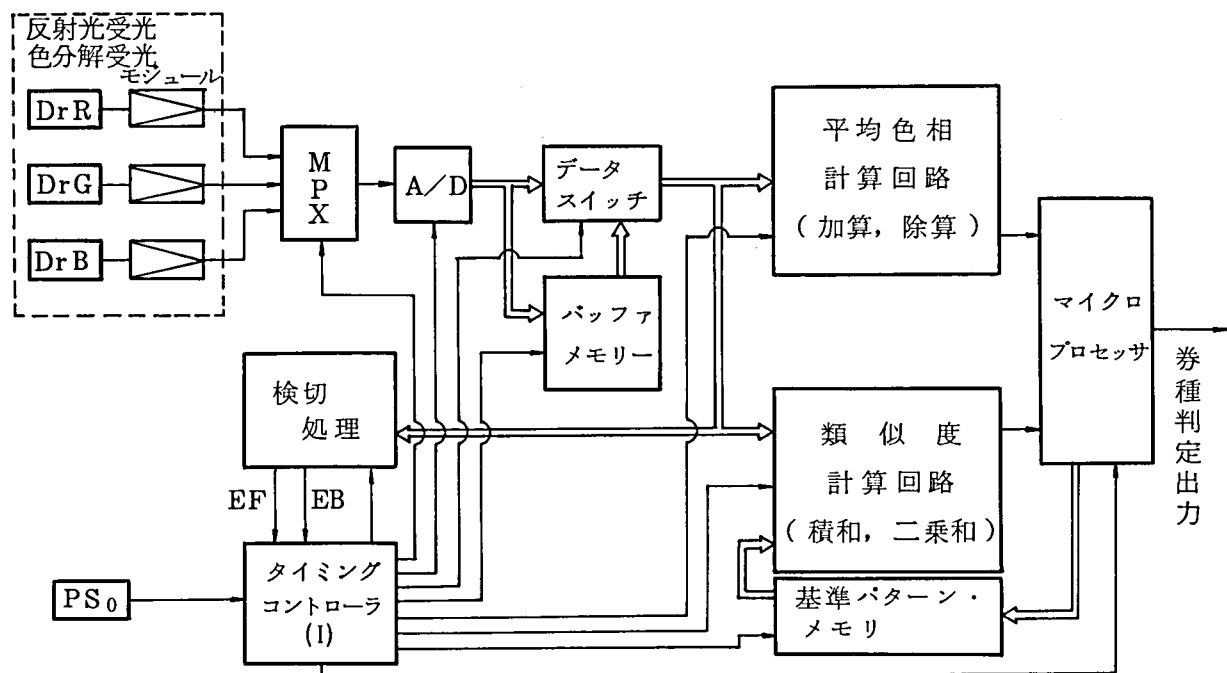


図 8 - 14 区分統合法による色彩印刷物の判別処理系

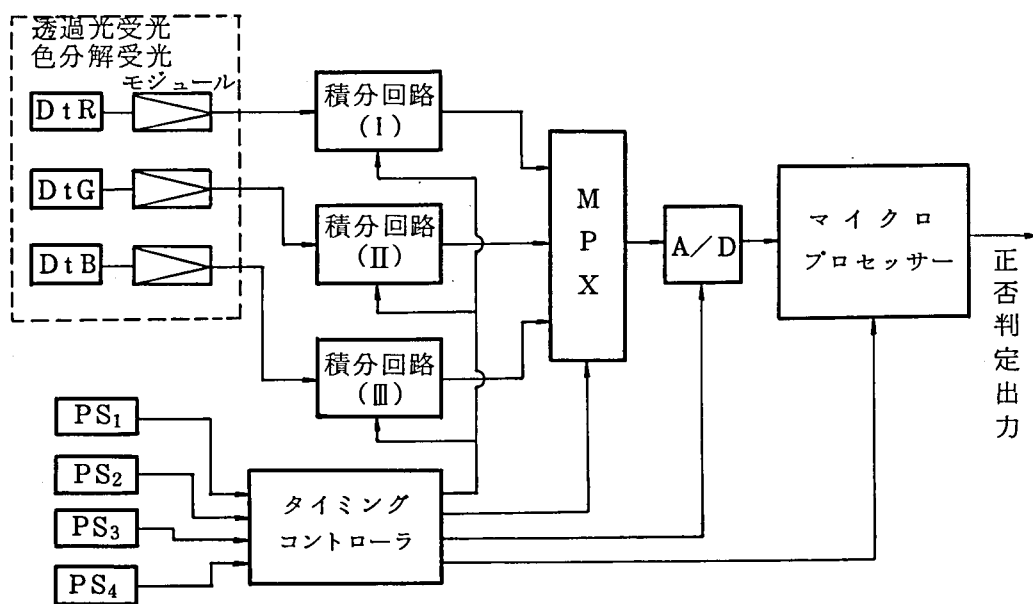


図 8 - 15 平均色測定 of 信号処理系

・プロセッサで行う。図8-5に示す二つの区分領域に対し、領域Ⅰの信号処理はMDモジュールの出力信号を同時処理する事により実行し、領域Ⅱの信号処理はMDモジュール出力信号を一但バッファ・メモリーに蓄わえ、信号の時間軸を反転して処理を行う。これにより領域Ⅰと領域Ⅱの信号処理は完全に同一の処理系で扱う事ができる。

図8-15は透過平均色法による正否判別のための信号処理系を示す。高速で搬送される対象物の平均色測定のためにMDモジュールの出力を時間軸に積分するが、判別処理速度を高めるため、各バンド出力に専用の積分回路を持たせ、基準光受光時の積分出力 V_{Ri} 、信号光受光時の積分出力 V_{Si} を求め、後段のマイクロプロセッサには積分結果のみ転送する。マイクロプロセッサの負荷を軽くする事により、図8-14と図8-15のマイクロプロセッサは共通化が可能である。

8. 4 色彩印刷物判別実験

アメリカDOLLAR券を具体的なサンプルとし、銀行券整理機上で判別方式を評価検討する。

A) 券種判別実験

券種判別性能を評価する項目はリジェクト率及び誤判別率である。

リジェクト率：券種判別のための類似度値（区分統合法による明度射影パターンの類似度と平均色相の差）が規定値に達せず、券種決定ができない銀行券の率

誤判別率：他の券種に誤って判別する率

アメリカDOLLAR券7券種について、任意抽出したサンプルを使用した券種判別実験の結果を表8-8に示す。券種判別のリジェクトは銀行券の損傷が著しい場合や搬送のねじれが許容値（ $\pm 5^\circ$ ）以上に大きい場合に発生する。著しい損傷券の率が高い低額券でリジェクト率が高く出ているが、その場合でも1.5%以下であり、銀行券整理機を運用する上で許容されるリジェクト率である。全券種を平均した場合、券種誤判別率0.01%以下、リジェクト率1.0%以下となった。8.2.2項では小数サンプルにより区分統合法の原理的な有効性を確認したが、ここでは銀行券整理機上で大量サンプルにより評価を行なった。これにより区分統合法による券種判別方式の実用的な有効性が確認された。

B) 異常券判別実験

異常券判別実験に当り、次の二つの誤判別率 F_N 、 F_P を定義する。

F_N : 異常券を正常券に誤判別する率

F_p : 正常券を異常券に誤判別する率

判別性能としては F_N は実質的にゼロ（実用上十分に小さい）であり、 F_p も許容範囲内でできるだけ小さい事が望まれる。

異常券判別実験用のサンプルとして、任意抽出のアメリカDOLLAR券1000枚（流通1\$券）、及びモデル異常券10枚（各種の類似印刷物及び類似紙片）を選定。8. 2節で述べた様に透過平均色測定による異常券判別は、測定検出値に対し上・下限いき値を設け、このいき値外である対象物を異常券と判別しているから、いき値の適否が異常券判別性能を左右する。上記サンプルに対し判別いき値を変化させた時の誤判別率 F_N 、 F_p の推移を図8-16に示す。判別いき値を $\pm 3.5\sigma$ に取った場合、 $F_N = 0\%$ ($< 1/10$)、 $F_p = 0.3\%$ となった。異常券と判定されリジェクト・スタッカーに排出された銀行券は人間が目視で再確認するが、 $F_p = 0.3\%$ 程度であれば人手による確認で問題のない数量である。異常券は一般に未知であり、この実験で使用したサンプルだけですべてを論じることができないが、図8-16の実験結果（ $F_N = 0\%$ 、 $F_p = 0.3\%$ ）から透過平均色法の有効性が主張できる。

異常券判別については本論文に述べた透過平均色法以外にも異った方式による検査判別（たとえば印刷インクの成分を検知する方法⁸⁻⁷）や印刷模様のパターンの特徴を検知する方法⁸⁻⁶）などを並行して行なっている。N種の判別方式を並列に実行する場合、総合誤判別率 F_{NT} 、 F_{PT} は

$$F_{NT} = \prod_{i=1}^N F_{Ni}$$
$$F_{PT} = \sum_{i=1}^N F_{Pi} \quad \dots (8-19)$$

ただし、 F_{Ni} : i番目判別装置が異常券を正常券に誤判別する率

F_{Pi} : i番目判別装置が正常券を異常券に誤判別する率

となる。個々の判別装置において $F_{Ni} < 1\%$ 、 $F_{Pi} < 0.3\%$ とすれば $N = 3$ 程度で実用的に十分な異常券判別性能が得られる。

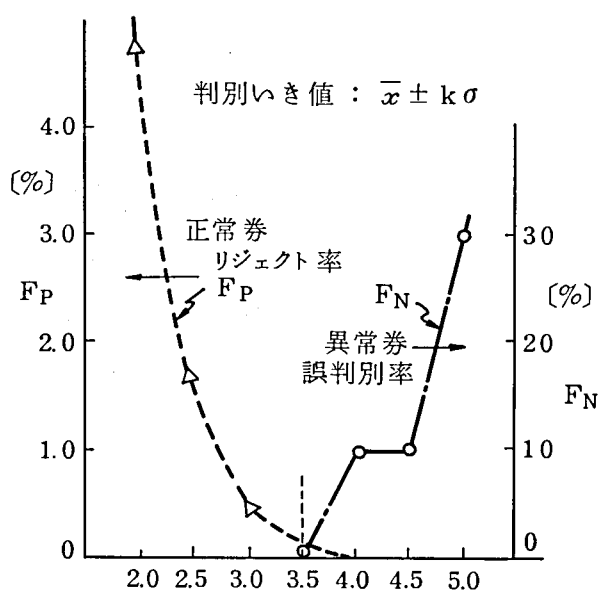
C) 排棄券判別実験

排棄券判別性能の評価は、排棄券見のがし率と排棄券誤判別率の二面から評価する必要

表 8-8 アメリカDOLLAR券を例にした券種判別実験結果

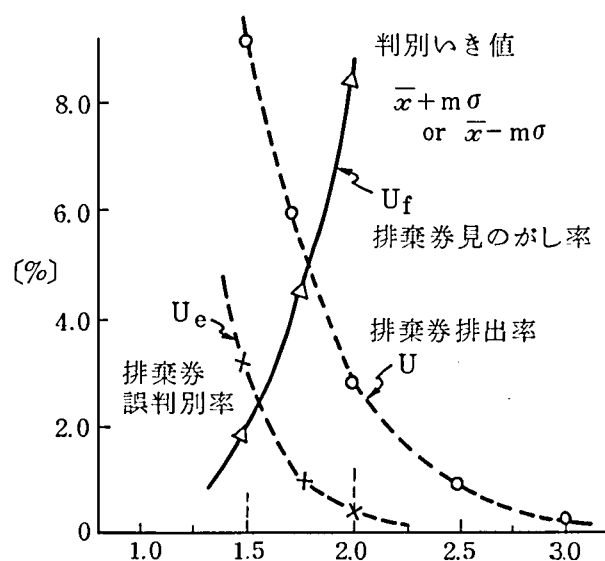
券種	サンプル延数 (サンプル数×回数)	リジェクト率	誤判別率
\$ 1	1000×5	1.1%	$\approx 0 (< 1/5000)$
\$ 2	200×10	0.6%	$\approx 0 (< 1/2000)$
\$ 5	200×10	0.9%	$\approx 0 (< 1/2000)$
\$ 10	200×10	0.7%	$\approx 0 (< 1/2000)$
\$ 20	100×10	0.6%	$\approx 0 (< 1/1000)$
\$ 50	—	(0.6%)	(≈ 0)
\$ 100	—	(0.6%)	(≈ 0)
平均	12000	0.9%	$\approx 0 (< 1/12000)$

(\$ 50, \$ 100 の結果は小数サンプルからの推定値)



判別いき値係数 : k

図 8 - 16 異常券判別実験結果



判別いき値係数 : m

図 8 - 17 排棄券判別実験結果

がある。また変色・汚損などによる排棄券は人間の視感で決まるものであるから、視感判別結果との対応の良さが特に重要となる。

N_0 : サンプル銀行券総数

N_{uh} : N_0 の中から視感判別により明らかな排棄券と判定された銀行券の数

N_{um} : N_0 の中から機械判別により排棄券と判定された銀行券の数

n_{uf} : N_{uh} の中で機械判別で正常券（非排棄券）に見のがした銀行券の数

n_{ue} : N_{um} の中で視感判別により明らかな正常券と判定された銀行券の数

以上の様に記号を定めると、排棄券判別評価ファクターは次式で決まる。

a) 排棄券排出率 : $U = (N_{um}/N_0) \times 100 [\%]$

b) 排棄券見のがし率 : $U_f = (n_{uf}/N_{uh}) \times 100 [\%]$

c) 排棄券誤判別率 : $U_e = (n_{ue}/N_{um}) \times 100 [\%]$

透過平均色法による排棄券判別は連続分布する測定量のある特定点に判別いき値を定めるから、上記 U_f 、 U_e がともに小さくなる様な最適ないき値を決める必要がある。

無作為抽出したアメリカDOLLAR券（\$1流通券）をサンプルとして、判別いき値を段階的に変えた場合の U 、 U_f 、 U_e の推移を図8-17に示す。判別いき値を $\lambda + 1.5\sigma \sim \lambda + 1.75\sigma$ に取ることにより、排棄券誤判別率を3%以下（ $U_e < 3.0\%$ ）に保ちつつ視感判定による明らかな排棄券の95%以上（ $U_f < 5.0\%$ ）を検知排出できることが図よりわかる。

見のがした排棄券（ n_{uf} ）は汚損が局所的な券である。この様な対象物をより確実に検知するためには平均色情報だけでなく、面分解能を高めた色彩情報を高速高精度に検出し、処理判別する技術が必要になるがこれは今後に残された課題である。銀行券では全体的汚損と排棄券との相関が高いため、図8-17に示すように透過平均色法により実用的に満足できる判別性能が得られた。

8.5 まとめ

銀行券に代表される色彩印刷物の判別に関し、種類判別方式として区分統合法、正否判別方式として透過平均色法を提案し、銀行券整理機上でその有効性を示した。内容を要約すると、

1) 区分統合法は色彩印刷物を複数の領域に区分し、各区分領域ごとに明度射影パターン

の類似度と、平均色相の差を求め、全体を統合して種類を判別する方式である。銀行券のように雑音成分の多い色彩画像の判別に有効であり、また形状情報と色彩情報を分離し、データ量を圧縮しているため高速の判別にも適している。

2) 透過平均色法は色彩印刷物の比較的広い領域の平均透過色に注目し、正否を判別する方法である。判別装置の光電系には第4章で述べた色分解受光モジュールを使用し、ダイナミック正規化と組み合わせる事によりS/Nの良い測色が可能であり、微妙な色差が問題となる人間の視感判別と比較しても、実用上十分な判別性能が得られる。

3) この様な判別方式を銀行券整理機に適用したところ、券種判別、排棄券判別、異常券判別に関して実用的に満足できる判別性能が得られた。装置全体を通じて、毎秒10枚以上の判別処理が可能であり、従来人間の目視作業であった銀行券整理業務を自動化・機械化することに道を開くことができた。

色彩にかかわる目視検査は多種多様であり、本章で扱った銀行券判別は一具体例に過ぎないが、区分統合法による色彩印刷物の判別方法、色分解受光モジュールとダイナミック正規化による平均色測定、統計データによる判別いき値の自動設定・自動修正などの考え方は、他の目視検査自動化にも適用可能な汎用性の高い方式であると考ええる。

第九章 結論

産業界の各方面で自動化・機械化が強力に進められており、色彩にかかわる業務についても年々その自動化・機械化に対する要求が高まって来た。色彩を扱う業務は多くは人間の目をたよりに処理されて来たが、人間の目の機能および目から得られる情報を処理判断する機能は非常に高度であり、これを実用レベルで機械化することには種々の困難がある。特に色彩にかかわる業務の機械化のためには、①物体色を高精度に測定し、色彩情報を高速に計算機に入力する技術、②色彩情報を効率良く処理するハードウェアおよびソフトウェア技術、が大きな研究開発課題である。

本論文はこのような背景のもとに行った研究のまとめであり、フォトダイオードを使用して物体色を高速高精度に測定する方法と、これを応用した調色計算装置や色彩印刷物判別装置など自動化・機械化装置の構成方法をまとめたものである。すなわち、本論文ではまずシリコン・フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合の誤差要因を詳細に分析し、これを基礎としてフォトダイオード一次元配列を使用して物体色を分光反射率値として高速高精度に測定する方法、およびフォトダイオードと色フィルタおよびミラーボックスの組み合わせにより色分解受光モジュールを構成して物体色の三刺激値を高速高精度に測定する方法を示した。次に分光反射率測定を産業的な分野に応用する主要な例として調色計算を取り上げ、調色過程における色合せ評価作業を計算機でシミュレーションする方法をまず開発し、これを使用して種々の調色計算の基礎的要因を検討するとともに調色計算装置のハードウェア、ソフトウェアの構成方法を明らかにした。さらに二次元的に分布する色彩情報を効率良く解析するための色彩画像解析システムの構成方法を明らかにし、これを活用して開発した色彩印刷物の判別方式と銀行券整理機について述べた。本研究において得られた成果ならびに今後に残された問題点を要約すれば次の如くである。

まず本研究において得られた成果を各章ごとに挙げると、第二章においてはシリコン・フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合の誤差要因を総合的に分析した。フォトダイオードは製法、構造により数種類の型が有るが、PN接合層を浅くした型のもの（たとえば低容量プレーナ拡散型や PNN^+ 型）は短波長側の感度が高くまた可視波長域の分光感度温度特性も安定しており、測色用に適している。直線性の良い受光器として使用するためには演算増幅器との組み合わせが不可欠であり、特に小さい光電流領域で十

分な測光精度を得るためにはFET入力段型の演算増幅器を使用する必要がある。

フォトダイオードと演算増幅器およびAD変換器から成る光電計測系の主要な計測誤差要因は、a) 光電流出力の非直線誤差、b) 熱雑音などの交流成分雑音による誤差、c) ドリフトなどの直流成分雑音による誤差、d) AD変換系の誤差、である。それぞれの誤差を理論式で示すとともに、代表的な光電計測系の誤差の具体値を示し、誤差を定量的に把握できるようにした。価格対精度比の良い光電計測系を得るためには全体の許容誤差に対し個々の構成要素の誤差をバランス良く配分することが重要である。

本章を通じて、フォトダイオードを精密測色用受光器として使用する場合の誤差要因が明らかになり、個々の目的に応じてフォトダイオードを使用した高性能な測色装置を設計することが可能になった。

第三章においてはシリコン・フォトダイオード一次元配列と、マイクロプロセッサを組み合わせて、分光反射率値を高速高精度に測定することの可能性を示した。波長 400~700 nmの範囲において10nm間隔の分光データを1秒間で測定する仕様のもとで、受光器の非直線誤差、雑音による誤差、ディジタル変換系の誤差を考慮するとき、全可視波長範囲において理論的に有効3けたの分光検出が可能である。また既存の高精度分光光度計と比較して、測定色差 1.0 CIE 単位程度の測色精度が得られ、物体色測定には実用的に十分な精度が得られる。受光器一次元配列で並列受光する場合、迷光誤差に対する対策が重要である。具体的には迷光検出専用の受光器を配置しデータ処理による補正で十分な補正効果が得られる。

このような方式の分光光度計により、従来の分光光度計と比較して格段に早く分光反射率データを計算機に入力することができ、調色計算などの省力効果を大幅に高めることが可能となった。

第四章においては物体からの反射光あるいは透過光を効率良く色分解受光し三刺激値を測定する方法として、フォトダイオードと色フィルターおよびミラーボックスを組み合わせた色分解受光モジュール(MDモジュール)を提案し、その設計方法と測色性能を示した。

MDモジュールのミラーボックスの構造は色分解受光器の受光の均一性と、信号光伝達率とのかね合で決める。ミラーボックス入射開口部の長辺を k 、ミラーボックスの長さを l とする時、 $3k \leq l \leq 5k$ となる様に設定すれば、99%以上の高い受光の均一性と20%以上

の信号光の伝達率が得られ、MDモジュールの効果を十分発揮することができる。結像レンズとダイクロイック・ミラーによる色分解受光方式と比較して、MDモジュールでは数十～数百倍の受光効率を得ることができ、結果的に高いS/Nの測色信号を得ることができる。

色分解受光器はフォトダイオードと色ガラスフィルタの組合せで構成するが、任意分光感度に合わせるためのフィルタの厚みの設計方法も明らかにした。この方法によりフォトダイオードを使用してルータ条件合わせ受光器を作れば、色度のずれ(Δx , Δy)が±0.02程度以内、明度のずれ(ΔY)が±0.2%程度以内で物体色測定が可能であり、自動化装置用の測色装置として十分な特性が得られる。

MDモジュールは色分解受光に広く応用可能であり、特に物体の比較的広い部分の反射平均色や透過平均色を測定する場合に有効である。わずかな色差を手がかりとする目視検査業務を自動化する際の効果的な測色装置を実現することができた。

第五章においては調色計算の色合わせ精度評価過程をディジタル計算機を使用してシミュレーションする方法を示し、これを応用して調色計算の基礎的な事項の解析を行った。

色材の配合比率が既知である色見本群を対象として考える場合、調色計算により得られた処方で色材の配合試験を行なった結果と、もとの色見本との色合わせ精度の評価過程は数式モデル化される。したがってこの過程を計算機でシミュレーションすることが可能であり、色材の試験配合と測色、あるいは試験配合と視感判定の手続きなしに種々の調色計算要因の解析が可能である。

調色計算にかかわる特定の因子の最適値は、個々の調色計算装置あるいは、個々の色材ごとにシミュレーションを実施して決定した方が良いが、比較的一般性のある問題として、(a) 分光反射率測定値に対する界面反射補正 (b) 色材基準定数の折線近似表現、の有効性をシミュレーションで確認することができた。

色合わせ評価過程を計算機でシミュレーションする方法を開発することにより、調色計算にかかわる種々の要因の解析を容易に行なうことが可能となり、高性能な調色計算装置の設計が容易となった。

第六章においては調色計算装置CMS-100型を例に取り、基礎式、計算機プログラム、分光光度計など調色現場で使用するのに適した新しい調色計算装置の構成方法を明らかにした。

調色計算は分光分布一致方式と三刺激値一致方式が考えられ、両者を組み合わせた等色計算方法が実用的には効果的である。調色現場では操作性が良く、小型の分光光度計が望まれるが、干渉フィルター式の分光光度計は等色精度の点から見ても調色計算に充分使用できる。調色計算機能の選択指示や色材組合せ指示などを専用に設けた操作盤を通じて行い、しかも分光光度計と操作盤を一体化することにより、操作性にすぐれた調色計算用の分光光度計を実現することができる。

浮動小数点数の乗除算を高速に実行できる計算機を使用すれば、調色計算は多くの場合1秒内で処理できる。したがってフォトダイオード次元配列を使用した分光光度計と組み合わせれば、測定時間と処理時間とのつり合いが取れた効率の良い調色計算装置を構成することができる。

調色計算装置を染色分野に適用したところ、色見本に対する平均色差が1.5(CIE単位)以下の色合わせ精度が得られ、調色計算装置の実用性が確認された。混紡布に対しても調色計算アルゴリズムを開発し、実用レベルに達する等色精度を得た。色合せ精度が高く、操作性のすぐれた調色計算装置の実現により、色材を扱う業務の総合的な効率向上が可能になった。

第七章においては二次元的に分布する色彩情報(色彩画像)を効率良く解析する手段として色彩画像解析システムについて論じ、ハードウェア、ソフトウェアの具体的な構成方法を示した。

色彩画像解析システムは色彩画像の入力装置、処理装置、表示装置、操作用コンソールで構成し、処理解析結果を色彩画像表示装置に表示し、操作者が表示結果を見ながら解析を進める会話型の解析システムが有効である。会話型の色彩画像解析を効果的に行うためには、解析指示に対して迅速な応答が必要であり、また多様な解析を行うためには機能の柔軟性が要求される。したがって高速で汎用性の有る画像処理装置が重要となる。

基本となる画像演算機能をハードウェア・モジュール化し、処理コマンドの組み合わせで多様な画像処理・解析を行う型の画像処理装置が色彩画像解析システムに適している。この場合局所並列処理型の構成を取れば、1画素当りの処理速度を1 μ sec程度以下にすることが可能であり、大部分の色彩画像解析に関し、待ち時間を感じさせない高速の応答が得られる。

色彩画像解析システムへの色彩情報の入力、高精度入力装置としてカラードラムスキ

ャナが適し、汎用入力装置としてはカラー I TV カメラが適している。色彩画像は個々の画素が独立の色彩情報 (R, G, B, 3 バンドの濃淡情報) を持つと見なされるから、濃淡画像を処理・解析するサブルーチン群と色彩解析サブルーチン群を用意して置けば、これらの組み合わせにより多様な色彩画像解析が可能である。

色彩画像は、通常の分光光度計や色彩計では扱えないが、本章で明らかにした会話型の色彩画像解析システムを使用すれば、処理アルゴリズムの開発やパラメータの最適値設定などを迅速かつ容易に行なうことができる。

第八章においては銀行券に代表される色彩印刷物の判別に関し、種類判別方式として区分統合法、正否判別方式として透過平均色法を提案し、それを応用した銀行券整理機について述べた。区分統合法は色彩印刷物を複数の領域に区分し、各区分領域ごとに明度射影パターンの類似度と、平均色相の色差値を求め、全体を統合して色彩印刷物の種類を判別する方式である。銀行券のように雑音成分の多い色彩画像の判別に有効であり、また形状情報と色相情報を分離し、データ量を圧縮しているため高速の判別にも適している。

透過平均色法は広い領域の平均透過色に注目して汚損券や異常券を判別する方法であり、光学的な積分と電気的な積分を組み合わせる事により S/N の良い測色が可能であり、微妙な色差が問題となる人間の視感判別と比較しても、実用上十分な判別性能が得られる。

判別装置の光電系には第 4 章で述べた色分解受光モジュールを使用し、ダイナミック正規化と組み合わせる事により安定した測色が可能である。この様な判別方式を応用した銀行券整理機を開発し、これまで目視により処理されていた銀行券検査選別業務を自動化・機械化にすることが可能となった。

次に残された問題および今後の課題は次の如くである。まず第 2 章、第 3 章、第 4 章に関係しては、物体色測定速度をさらに高速化することである。本研究では物体色測定の応用目的を一応限定し、そこから来る要求に合わせて目標速度を設定したが、一般に要求速度は今後増々高まる。フォトダイオードを使用して物体色を測定する場合の速度と精度の限界を理論的に明らかにすることが必要である。そのほか化合物半導体やアモリファス・シリコンなどによる受光器など新しい受光器も次々と開発されている。新しい受光器の特性を生かした物体色測定装置の開発も重要な課題である。

第 5 章、第 6 章に関係しては、調色計算装置の適用範囲拡大が大きな問題である。本論文では二定数理論を基礎とした調色計算装置の構成方法を明らかにしたが、半透明プラス

チェックなど二定数理論が必ずしも適用できない対象物に対して新しいあるいは改良された調色計算理論が必要である。また着色工程や染色工程における調色のオンライン制御への発展も今後の課題である。

第7章、第8章に関係しては、他の多くの分野における目視検査の自動化に対する要求に答えることが今後の課題である。本論文においては色彩印刷物の判別方式を示し、これを生かした銀行券整理機の構成方法を述べたが、色彩に関係する目視検査業務は多様であり、銀行券整理機は一例に過ぎない。フォトダイオードによる物体色の高速高精度測定技術および色彩画像解析システムを生かし、個々の要求に合致した自動化装置の開発が今後の課題である。本研究では2次元的に分布する色彩情報を極力情報量を少なくして扱う方向で考えて来たが、今後は大量の色彩情報を色彩画像のまま扱う技術、すなわち色彩画像処理あるいは色彩画像認識技術の研究開発と実用化が必要である。

以上本研究の成果と今後の課題を各章ごとにまとめた。再度要約すると、まずフォトダイオードを使用して物体色を分光反射率値あるいは三刺激値として高速高精度に測定する方法を確立し、次にこの測色技術を生かし調色計算装置と色彩印刷物判別装置など色彩を扱う自動化・機械化装置の構成方法を明らかにした。色彩情報処理や色彩を扱う業務の自動化・機械化の要求は多様であり、今後増々活発な研究開発がなされるであろうが、本研究の基本的考え方がこの分野の今後の研究に役立つならば幸である。

参考文献

- 1-1. 馬場護郎, 「測色装置の動向」照学誌, Vol.62, No.12 (昭53) P634
- 1-2. 日本色彩学会, 「色彩科学ハンドブック, 第7章 測色と色比較の方法」
東京大学出版会, P183 (昭55)
- 1-3. P. Kubelka, F. Munk, "Ein Beitrag zur Optik der
Farbanstriche" Z. tech. Physick, Vol.12 ('31) P593
- 1-4. 香取寛二, 「PIN形ホト・ダイオードの直線性」
照学誌, Vol.56, No.12, (昭47) P673
- 1-5. 津上退助, 「色彩図柄を有する紙幣など印刷紙片の真偽検査装置」
特公昭47-39435 (昭47)
- 1-6. 谷善平, 吉川俊文, 他, 「半導体カラー・センサ」
テレビジョン学会技術報告, ED418 (昭53) P13
- 1-7. 永野俊, 大照完, 「学習機構を用いた自動色合せ計算機」
計測と制御, Vol.6, No.11 (昭42) P782
- 1-8. H. R. Davidson, "Comic Application Report, No.1" ('68)
- 1-9. 村田幸男, 「カラーフォーミュレーション」照学誌, Vol.62, No.12(昭53) P651
- 1-10. W. D. Ross, "Kubelka-Munk Formula Adapted for Better
Computation" Journal of Paint Technology, Vol.39, No.511('67)P515

- 2-1. 戸所, 岩佐, 「シリコンPinフォトダイオード」
National Technical Report, Vol.22, No.1('76) P19
- 2-2. 中島, 「シリコン・ブルーセル(SBC)」電子計測, No.7('68) P64
- 2-3. T. E. Hartman, "Transient Photovoltaic Response of
Diffused-junction Silicon Photodiodes"
Solid State Electronics, Vol.3, No.13, ('61) P127
- 2-4. 肥後, 室井, 「Si 光電池の光電流測定回路に関する理論的考察」照学誌,
Vol.56, No.10, (昭47) P590

- 2-5. 室井, 石野, 「Silicon光電池の精密受光器としての検討」照学誌,
Vol.52, No.4, (昭43) P124
- 2-6. 石井, 「測光器用電子回路」照学誌, Vol.58, No.11, (昭55) P620
- 2-7. P. G. Witherell & E. Faulhaber,
“The Silicon Solar Cell as a Photometric Detector ”
Applied Optics , Vol.9, No.1('70) P73
- 2-8. Paul H. Wendland , “Solid State Combo Senses Light Well
Enough to Vie With Tubes” Electronics, May 24, ('71) P50
- 2-9. Robert H. Hamstra & P. H. Wendland, “Noise and Frequency
Response of Silicon Photodiode Operational Amplifier
Combination” Applied Optics, Vol.11, No.7, ('72) P1539
- 2-10. J. G. Graeme , G. E. Tobey, “Operational Amplifiers ”
McGRAW-HILL('71) P51
- 2-11. 浜松ホトニクス技術資料, 「フォトダイオード」 ('82)
- 3-1. E. A. Beaver , C. E. Mc Ilwain , “A Digital Multichannel
Photometer ” The Review of Scientific Instruments,
Vol.42, No.9, ('71) P1321
- 3-2. G. Horlick, E. G. Coddington, “Some Characteristics and
Applications of Self-Scanning Linear Silicon Photodiode
Arrays as Detectors of Spectral Information”
ANALITICAL CHEMISTRY, Vol.45, No.8, ('73) P1490
- 3-3. Burr-Brown Research Corporation, “Application Note ;
Principles of Data Acquisition and Conversion ” ('79)
- 3-4. 中川靖夫, 「紫外線計測」照学誌, Vol.57, No.4 (昭48) P203
- 3-5. 日本色彩学会, 「色彩科学ハンドブック, 第8章 色差」東京大学出版会,
P277 (昭55)
- 3-6. 久保田広, 他, 「光学技術ハンドブック, 12章 分光機器」朝倉書店,
P1014 (昭43)

- 3-7. 中村靖, 西頭昭弘, 「受光器アレイとマイクロプロセッサによる物体色的高速測定装置」照学誌, Vol.66, No.4 (昭57) P114
- 3-8. 中村靖, 西頭昭弘, 「分光検知装置」特公昭54-6230 (昭54)
- 4-1. 中谷明男, 伊藤宏, 柴田芳彦「採光ダクトの研究」照学誌
Vol. 65, No. 10 (昭56) P34
- 4-2. H. Wright, C. L. Sanders, et al, "Design of Glass Filter Combinations for Photometers" Applied Optics, Vol. 8, No. 12 ('69), P2449
- 4-3. H. Kato, S. Morinaga, A. Yoshida, "A new integrated transducer for color distinction" Journal of Physics E: Scientific Instruments Vol. 9 ('76) P1070
- 4-4. 松田文夫, 佐古澄男, 上田実, 「マイクロコンピュータを使用した産業用ロボットのためのカラーセンサ」 システムと制御 Vol. 24, No.3('80)p83
- 4-5. 二宮光雄, 長谷川伸, 和久井孝太郎, 「撮像工学」 コロナ社 (昭54) p8
- 4-6. 中村靖, 大冨部興, 他 "Aparatus for identifying sheet-like printed matters" US Patent 4319137('82)
- 4-7. 大冨部興, 中村靖, 「印刷物の正誤判別装置」 特公昭57-3992(昭57)
- 4-8. 中村靖, 富永守, 他 「色分解受光モジュールと色彩印刷物判別装置への応用」
照学誌 Vol.68, No.10 (昭59) P20
- 5-1. D. B. Judd, G. Wyszecki, "Color in Business, Science and Industry", John Wiley and Sons, Inc., ('63) P 368
- 5-2. Paul Kubelka, "New Contributions to the Optics of Intensely Light-scattering Matearials" J. O. S. A., Vol. 38, No. 5 ('48) P 448
- 5-3. D. R. Dunkan, "The Color of Pigment Mixtures"
Proc. Phys. Soc., Vol. 42 ('40) P 390
- 5-4. J. L. Saunderson, "Calculation of the Color of Pigmented

- Plastics " J. O. S. A. , Vol. 32, No . 12 (' 42) P 727
- 5-5. Eugene Allen, "Basic Equations Used in Computer Color Matching " , J. O. S. A. , Vol. 56, No . 9 (' 66) P1256
- 5-6. T. Atkins , "Technical Notes, Instrumental Approaches to Colorant Formulation" , J. O. S. A. , Vol. 56, No . 5 (' 66) P 711
- 5-7. 湊 幸衛, 江森 康文, 他「Reference Color による色材混合について」
千葉大学工学部研究報告, 第18巻, 第33号 (' 67) P31
- 5-8. 中村 靖, 「色合わせ評価の計算機シミュレーションによるカラーマッチング
手法の解析」照学誌, Vol. 63, No . 7 (昭54) P 353
- 5-9. 中村 靖, 山下恭孝, 森 礼於, 「カラーマッチング予測計算に関する二、三の
検討」電気四学会連大, (昭45) P 962
- 6-1. H. R. Davidson , H. Hemmendinger , J. L. R. Landry ,
"A System of Instrumental Color Control for Textile
Industry " J. Soc. Dyers and Colorists, Vol. 79 (' 63) P 577
- 6-2. C. G. Leete, "Digital Computer Method for Colorimetric Matches"
Journal of Paint Technology , Vol. 38, No . 3 (' 66) P 136
- 6-3. Paul H. Mc Ginnis , "Spectrophotometric Color Matching with the
Least Squares Technique" Color Engineering,
Vol. 5 , No . 6 (' 67) P22
- 6-4. H. R. Davidson , M. Taylor , "Prediction of the Color of
Fiber Blends " J. O. S. A. , Vol. 55, No . 1 (' 65) P96
- 6-5. 村田幸男, 今田邦彦, 他「複合繊維染色のコンピュータカラーマッチング (I) 」
加工技術, Vol. 8 , No . 8 (' 73) P 517
- 6-6. 中村靖, 杉山春夫, 森礼於, 「カラーマッチングシステムにおける分光測定器の
検討」照明連大, (昭46) P85
- 6-7. 中村靖, 田村宏, 他「オンライン分光測定データ処理」照明連大, (昭47) P85
- 6-8. 芋岡正教, 中村靖, 他「東芝カラーマッチングシステム CMS-101形」

東芝レビュー, Vol. 26, No. 10 (昭46) P 1

6-9. M. Imooka, Y. Nakamura, "Color Matching System Easy to Operate" TOSHIBA REVIEW, No.4('73) P7

6-10. Y. Nakamura, M. Imooka, L. Mori, "A New System of Instrumental Color-matching and Its Application to a Color-matching of Mixed-yarn" ACTA CHROMATICA, Vol.2, No.4('73) P119

7-1. 森健一, 米山恒雄, 渡辺貞一, 他「濃淡図形認識の研究開発」

パターン情報処理システム調査・研究報告 PIPS-R-No.16 ('77, 11月) P69

7-2. 伊藤貴康, 「色彩図形認識システム」

パターン情報処理システム調査・研究報告 PIPS-R-No.16 ('77, 11月) P79

7-3. 木戸出正継, 田端光男, 他「小形高速画像処理システムTOSPIX」

東芝レビュー, Vol.37, No.12 (昭57) P1047

7-4. 田島譲二, 井戸恵子, 「色彩情報処理システムによる色の解析」

信学技報, Vol.76, No.196 ('76) IE 76-67, P 7

7-5. 阿部俊雄, 「画像データ入出力装置」映像情報, Vol.14, No.8 ('82) P53

7-6. 相原則夫, 蓮田広保, 「小形画像処理システムTOSPIX」

東芝レビュー, Vol.38, No.6 (昭58) P488

7-7. S. Kageyama, M. Kidode, Y. Nakamura, et al.,

"Compact Color Image Processor for Electronic Still Camera"

JAPAN DISPLAY '83 ('83, October) P180

7-8. Y. Nakamura, M. Kidode, M. Tabata, et al., "Automatic

Thermometer Inspection System by a High-speed Image

Processor" IECON'84 ('84, October) P1022

7-9. 吹抜敬彦, 「カラーテレビジョン信号の合成と分離」

テレビジョン学会誌, Vol.33, No.4 ('79) P271

7-10. 辻秀一, 中塚国男, 他「カラーITVカメラを用いた色彩画像入力システム」

信学技報, IE-76-62 ('76) P17

- 8-1. Y. Mizobuchi, T. Nishihara, S. Suganuma ,
"Toshiba Cash Arranger " TOSHIBA REVIEW, No.115,
May・Jun ('78) P27
- 8-2. K. Takehana , Y. Hashimoto, H. Takahashi,
"Toshiba Currency Note Arranger " TOSHIBA REVIEW, No.130,
Nov・Dec ('80) P21
- 8-3. K. Takehana , T. Ishida , K. Matsumoto,
"New Currency Note Arranger for U. S. Dollar Banknotes"
TOSHIBA REVIEW, No.141, Sep・Oct ('82) P25
- 8-4. 中島俊一, 広川勝久, 原田一, 「東芝自動預金機」東芝レビュー,
Vol.31, No.4 ('76) P325
- 8-5. 小寺宏, 板橋隆三, 他「色彩図案の色分離方式」テレビ全大 (昭51) P223
- 8-6. 溝淵靖夫, 中村靖, 「印刷物の判別装置」特公昭57-13898 (昭57)
- 8-7. Y. Nakamura , K. Otomibe, et al . ,
"Currency note indentification system " US Patent 4386432 ('83)
- 8-8. 中村靖, 西頭昭弘, 他「紙状物体の正否判別装置」特公昭56-34816 (昭56)
- 8-9. 中村靖, 大富部興, 他「印刷物の種類判別装置」特開昭 56-149685 (昭56)
- 8-10. 中村靖, 「印刷物の正否判別装置」特公昭 58-9988 (昭58)

謝辞

本論文をまとめるに当り、終始適切な御指導と御助言を頂いた京都大学工学部電子工学科教授 板谷良平博士ならびに電気第二学科教授 木嶋昭博士に深く感謝いたします。

本研究は筆者が株式会社東芝・総合研究所に昭和43年に入社以来行ってきた仕事に関するものであります。本論文をまとめる機会を与えていただいた総合研究所 永井淳所長、情報システム事業本部 仲野博前技師長、情報通信システム技術研究所 下村尚久所長、総合研究所情報システム研究所 森健一所長に深く感謝いたします。本研究を遂行する過程で種々御指導、御助言をいただいた総合研究所 森礼於首席技監、情報通信システム技術研究所 溝渕靖夫部長、渡辺貞一郎長、米山恒雄部長、同社府中工場計測品質保証部 芋岡正教部長、東京電気技術研究所 新倉勇技術主幹に厚く御礼申し上げます。

さらに本研究を遂行する過程で御協力いただいた東芝総合研究所 富永守研究主務、木戸出正継主任研究員、澤田順夫研究主務、久野義徳主事、情報通信システム技術研究所 石田豪課長、栗山聖之主査、大富部興主事、同社横須賀工場光源開発研究部 杉山春夫主務に感謝の意を表します。特に第四章では富永研究主務、第七章では木戸出主任研究員の多大な御協力を得た。かさねて御礼申し上げます。